

JUHA SELÄNPÄÄ

CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenne- väylien pohjatutkimusmenetelmänä

ESISELVITYS



Juha Selänpää

CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä

Esiselvitys

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2015

Liikennevirasto

Helsinki 2015

Kannen kuva: CPTU-kärjen rakenne, Juha Selänpää

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-092-6

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 029 534 3000

Juha Selänpää: Esiselvitys: CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä. Liikennevirasto, infra ja ympäristö -osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2015. 59 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-092-6.

Avainsanat: CPTU, puristinkairauskoe, tarkkuus, virheet

Tiivistelmä

Sähköinen puristinkairauskoe huokosvedenpainemittauksella eli lyhyesti CPTU-kairauskoe mittaa huokosvedenpaineen lisäksi kärkikartioon ja vaippahylsyyn kohdistuvaa vastusta. Nykyisten vaatimusten lisäksi kärjessä on oltava myös kaltevuuden eli kairauksen suoruuden mitaus. CPTU-kairauskokeessa maahan puristetaan CPTU-kärkeä vakionopeudella 2 cm/s ja mitataan yleensä 2 cm välein nämä neljä parametria. Tuloksina saadaan lähes jatkuva mittausdata.

CPTU-kairauskokeen soveltuvuus on hyvin laaja. Kairauskokeita voidaan tehdä koheesiomaista kitkamaalajeihin, kunhan mittausarvot eivät ylitä kärjen kapasiteetteja. Liian suuret kivet maassa voivat esimerkiksi aiheuttaa kärkeen liian suurta vastusta, joka voi johtaa kärjen rikkoontumiseen. Mitattujen parametrien avulla voidaan arvioida useita pohjarakentamisessa tarvittavia parametreja. Parametrit määritetään pääosin teorian ja empiiristen kokemusten perusteella. Kärkivastuksen arvoa voidaan käyttää kuitenkin suoraa suunnitteluun, sillä korjatun kärkivastuksen oletetaan vastaavan maan kantavuuden maksimiarvoa.

Kairauskokeen onnistumisen kannalta on tärkeätä noudattaa kairauskokeen hyväksytyjä ohjeita. CPTU:n Eurostandardi vahvistettiin Suomessa käyttöön vuoden 2013 alussa, mutta käännös on vasta valmistumassa. Sen takia alalla on vielä yleisesti käytetty aiempaa ohjeistusta Kairausopas 6:ta. Osin ohjeistukset tukevat toisiaan sillä kairausoppaassa on selitetty tarkemmin työvaiheita. Suurempia ristiriitaisuuksia näiden ohjeiden välillä ei ole.

Tässä työssä käydään läpi ohjeistuksissa mainittuja asioita, jotka vaikuttavat kairauksen onnistumiseen sekä selvennetään näitä asioita tarkemmin. Kärjen kuormituskapasiteetin kasvaessa mittaustarkkuus heikkenee, minkä takia on oleellista valita sopivalla kuormitusalueella varustettu kärki tutkimuksen tarkoituksen mukaan. Koheesiomaiden parametrien määrittämiseen on viimeaikaisten tutkimusten perusteella käytettävä ns. herkkää kärkeä. Tutkimuksissa käytettyjen herkkien kärkien kuormitusalueet ovat olleet noin 0...10 MPa, mutta tämä ei kuitenkaan pois sulje sitä, ettei hieman laajemman kuormitusalueen omaava kärki mittaisi yhtä tarkkoja arvoja.

Sopivan kärjen valinnan lisäksi mittaustarkkuutta voidaan parantaa säännöllisellä kärjen huollolla, testauksella sekä kalibroinnilla. Kairauskokeen huolellisella valmistelulla voidaan parantaa kairauksen mittaustarkkuutta, kun kiinnitetään huomiota mm. kärjen huolelliseen kyllästämiseen, kärjen lämpötilan tasaukseen maan lämpöiseksi ennen nollalukemien lukemista, kairauksen aloitus suoruuteen sekä oikeaan puristusnopeuteen. Varsinkin kyllästämällä on kairauskokeen onnistumisen kannalta hyvin suuri merkitys. Kyllästämisen epäonnistuminen voi tehdä mittausdatan lähes arvottomaksi. Mittausdatan jälkikäsitteilyllä voidaan myös parantaa mittaustarkkuutta. Kärki- ja vaippavastuksen arvoja voidaan korjata muodostuneen huokospaineen aiheuttamalta vääristymältä vastuksissa. Kairauksen epäsuoruus voidaan korjata vastaamaan pystysuoraa etäisyyttä aloitustasosta.

Alkunolla- ja loppunollalukemien avulla voidaan arvioida kairauskokeen onnistumista. Mitä pienempi on nollalukemien poikkeama testin alku- ja loppunollalukemien välillä kärki- ja vaippavastuksessa, sitä paremmin alkuvalmistelut on useimmiten tehty. Alkunollalukemien avulla määritetään mittalaitteiston nollatasot kuormittamattomana.

Juha Selänpää: Preliminär studie: Kartläggning av jordmån för trafikleder med hjälp av CPTU-sondering. Trafikverket, infrastruktur och miljö. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 25/2015. 59 sidor och 1 bilaga. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-092-6.

Sammanfattning

CPTU-sondering mäter olika parametrar som spetstryck, portryck, mantelfriktion vid spetsen. Mätning av sondens lutning utförs också rutinmässigt nufortiden. Sonden drivs ned i jorden med en konstant hastighet på 2 cm/s. Avläsningsfrekvensen är vanligen 1 sekund, eller en mätning per 2 cm, så att man får kontinuerliga kurvor av mätvärdena.

CPTU-sonderingens användningsområde är relativt stor, den kan användas i både fasta och lösa jordar förutsatt att man inte överstiger sondens kapacitet. Ifall det finns stor stenar i jorden kan orsaka överbelastning till sonden, vilket kan leda till strukturella skador. Mätvärdena kan användas till att bestämma olika geotekniska parameter. Bestämningen grundar sig på både teori och empirisk erfarenhet. Spetsmotståndet kan dock användas direkt i design, eftersom den korrigerade spetsmotståndet motsvarar jordens maximala bärförmåga.

En lyckad CPTU-sondering förutsätter att man strikt följer anvisningarna i standarder. Den europeiska CPTU-standard har fått officiell ställning i Finland från början av 2013, med dess översättning till Finska är ännu inte färdig. På grund av detta används den gamla Finska anvisningen Kairausopas 6 ännu i stor grad. Anvisningen är inte motstridig med den europeiska standarden, men den ger en del mer detaljerad information.

Den här rapporten behandlar de krav som standarderna och anvisningarna ställer till utförandet av CPTU-sonderingarna, och redovisar dem noggrannare. När sondens kapacitet ökar, minskar dess noggrannhet. Därför är det viktigt att välja rätt sond till var ändamål. I de senaste forskningarna har man använt så kallade sensitiva sonder med hög noggrannhet för lösa jordar. Sondernas lastkapacitet har varit ca. 0...10 MPa. Det här betyder dock inte, att man inte skulle kunna använda sonder med lite högre kapacitet också för lösa jordar.

Regelmässig underhåll, efterkontroll och kalibrering av utstyr förutsätts också för att garantera en lyckad CPTU-sondering. Före och under själva sondering skall förberedelserna göras noggrant, med speciell betoning på mätning av filter och portryckssystem, temperatur stabilisering av sonden före mätning av noll värden, rakheten på sondstängerna och korrekt neddrivningshastighet under sonderingen. Speciellt mätningen af portryckssystemet har stor betydelse, eftersom misslyckande i det kan förstöra hela sonderingen. Kvaliteten på resultaten kan också förbättras efteråt. Spetsmotståndet och mantelfriktionen kan korrigeras mot porvattentrycket. Djupet av sondering kan korrigeras med hjälp av inklinationen.

Med hjälp av nollpunktsförskjutning före och efter sonderingen kan man också evaluera hur lyckad sonderingen ha varit. En liten nollpunktsförskjutning är ofta ett resultat av god förberedelse. En signifikant avvikelse kan orsakas av stora laster vid stopp av sten eller hårda lager.

Juha Selänpää: Preliminary study: Soil characterization for traffic routes by CPTU testing. Finnish Transport Agency, Infrastructure and Environment. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 25/2015. 59 pages and 1 appendix. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-092-6.

Summary

The electrical cone penetration test with pore-water pressure measurement, shortly CPTU test, provides information about cone resistance, sleeve friction and pore-water pressure during penetration. At present inclination sensor is almost always included to identify straightness of penetration. The standard rate of penetration for CPTU is 2 cm/s and parameters are measured mainly every 2 cm of penetration. As a result an almost continuous measurement data is obtained.

Application of the CPTU test method is very wide. Tests can be done in both coarse grained and fine grained soils as long as the capacity of the cone is not exceeded. For example too large stones in the ground can cause overload to the cone tip, which can lead to structural damage. The test results can be used to evaluate a variety of engineering soil parameters. The estimations are based on both theories and empirical experiences. The tip resistance value can however be used, straight away to design, because the corrected tip resistance value is assumed to correspond to the maximum value of the bearing capacity.

The succeed in the penetration test; it is important to comply with the approved test instructions. The European Standard EN ISO 22476-1:2012 has the status of a Finnish national standard from the beginning of 2013, but the translation is still on the way. Because of this, the old instruction Kairausopas 6 is still much in use. There is no larger discrepancy in between these two guidelines, while the old Kairausopas 6 support the new standard by giving more detailed information.

In this report the issues affecting the accuracy of the test mentioned in the guidelines are explained in more detail. Usually measurement accuracy deteriorates with increasing measuring range, and therefore it is essential to choose a cone with suitable measuring range for the purpose of the investigation. In recent studies so-called sensitive cones have been used for soft clays. The load range for tip resistance have been around 0...10 MPa, but this does not exclude the use of cones with somewhat wider range for these soils as well.

Regular maintenance, testing, and calibration of equipment improve the accuracy of CPTU test. By careful preparation of the tests with emphasis on things like saturation of pore water measuring system, temperature stabilization, inclination of probe and the rate of the penetration the quality of CPTU test can also be improved. Especially successful saturation is a key issue, as a lack of saturation could make the measurement data almost worthless. Post-processing of the measuring data can also improve the accuracy of measurement. Especially in soft clay it is necessary to correct the cone resistance for pore water pressure effects. Same correction should be done also for sleeve friction if it is possible. Based on the inclination data the measured length can be corrected to the actual penetration depth.

Zero readings before and after the test can also be used to evaluate the accuracy of the penetration test. The smaller the difference between the zero readings is, the better is the accuracy of measurement. This is usually affected by good preparations before test. The zero readings before the test are recorded without any loading and the temperature is stabilized at ideally ground-temperature.

Esipuhe

Tämä selvitys on laadittu esiselvityksenä puristinkairauskokeen (CPT/CPTU) hyödyntämiseksi liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä. Menetelmän käytön yleistymiseen vaaditaan mittauslaitteiston ja menetelmän tuntemista, jotta kairauskokeen mittausten tarkkuutta voidaan parantaa ja tuloksia luotettavasti hyödyntää. Laadukkaiden mittausten suoritus onkin ensimmäinen askel puristinkairauskokeiden hyödyntämisessä liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä. Nyt tämä askel on osittain otettu tutkimuspuolella ja osittain myös menetelmän potentiaali todettu lupaavaksi. Tämän esiselvityksen on tarkoitus jakaa tämä mittauksen tarkkuutta käsittelevä tieto myös pohjatutkijoille sekä pohjatutkimuksia tilaaville tahoille.

Toinen ja kolmas askel koskevat projektin jatkoa esiselvityksen jälkeen. Jatkossa tul-
laan järjestämään koulutuksia geotekniikan parissa työskenteleville tahoille, jotta kenttätöntekijät ja tuloksia hyödyntävät tahot saavat riittävän osaamisen tutkimusmenetelmästä. Tutkimuspuolella puristinkairauskokeen tuloksista pyritään määrittämään kahden jatkotutkimuksen avulla maan leikkauslujuus sekä muodonmuutosparametreja.

Tämän esiselvityksen ohjeistuksen sekä eurostandardin 22476-1 ristiriitaisuuksissa eurostandardin ohjeistus on aina pätevämpi.

Selvityksen on tehnyt Juha Selänpää ja työtä ovat ohjanneet Tim Länsivaara Tampereen teknillisestä yliopistosta, Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä sekä Erkki Mäkelä ja Panu Tolla Liikennevirastosta.

Helsingissä huhtikuussa 2015

Liikennevirasto
Infra ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
1.1	CPTU-kairauskokeen käyttö ja edut.....	9
1.2	Puristinkairauskoe mekaanisella mittauksella: historia ja kehitys	10
1.2.1	Vuosi 1932	10
1.2.2	Vuosi 1935	10
1.2.3	Vuosi 1948	11
1.2.4	Vuosi 1953	11
1.3	Puristinkairauskoe sähköisellä mittauksella: historia ja kehitys.....	12
1.3.1	Vuosi 1948	12
1.3.2	Vuosi 1949–1957	12
1.3.3	Vuosi 1965	13
1.3.4	Vuosi 1974	13
1.3.5	Nykytilanne	13
1.3.6	Mittauksen luotettavuus	15
1.4	CPTU-kairauskoemenetelmä.....	16
1.4.1	Työn suoritus lyhyesti	16
1.4.2	Käyttöluokat	17
1.5	Tulosten tulkinta.....	19
1.5.1	Suljetun leikkauslujuuden tulkinnan teoria CPTU-mittaustuloksista...19	
1.6	CPTU-kairauskokeen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ja virheitä.....	21
1.6.1	Kärkivastuksen ja vaippavastuksen mittausanturit.....	21
1.6.2	Kärkivastuksen ja vaippavastuksen korjaus.....	23
1.6.3	Nollalukemat.....	25
1.6.4	Lämpötilavaikutukset.....	26
1.6.5	Kaltevuus	28
1.6.6	Negatiivinen vaippavastus mittauksessa	30
1.6.7	Kalibrointi.....	31
1.6.8	Kalibrointi alueen ja portaiden valinta.....	34
1.6.9	Kyllästämiseen käytettyjä nesteitä/rasvoja	34
1.6.10	Kärjen epäonnistunut kyllästäminen.....	35
1.6.11	Negatiivinen huokospaine	38
1.6.12	Huokosvedenpainemittauksen kalibrointi.....	39
1.6.13	Vaippavastuksen ja kärkivastuksen mittauksen syvyyskorjaus	41
1.6.14	Kärjen huolto ja puhdistus	41
1.6.15	Mittauslaitteiston virheet	42
1.6.16	Mittauksen resoluution vaikutus tuloksiin	42
1.6.17	Kärkikartion, suotimen ja vaippahylsyn mittatoleranssit.....	42
1.6.18	Puristusnopeuden vaikutus.....	44
1.6.19	Pysähdyksistä johtuvat epäjatkuvuudet	45
1.6.20	Maan kerroksellisuuden vaikutus.....	45
1.7	Esimerkkikohteet.....	47
1.7.1	Kairauskokeen reaaliaikainen seuranta	47
1.7.2	Oikean kärjen valinta.....	48
1.7.3	Epäonnistunut kyllästäminen/kyllästämisen menetys	50
1.7.4	Suljetun leikkauslujuuden tulkinta	51
	LÄHTEET	58
	LIITTEET	
	Liite 1 Perniön siipikairaustulokset	

Termistö

a	Kärjen nettopinta-alasuhde (kärjen pinta-alakerroin)
A_n	Kärkikartioon kohdistuvia voimia välittävän varren poikkipinta-ala suotimen kohdalla
A_s	Kitkahylsyn pinta-ala
A_{sb}	Kitkahylsyn pohjan poikkipinta-ala
A_{st}	Kitkahylsyn yläosan poikkipinta-ala
b	Materiaaliparametri
CPT	Sähköinen puristinkairauskoe
CPTU	Sähköinen puristinkairauskoe huokosvedenpaine-mittauksella
f_s	Mitattu vaippakitka
f_t	Korjattu vaippakitka
N_c	Teoreettinen kärkikerroin suljetun leikkauslujuuden tulkinnalle
$N_{\Delta u}$	Teoreettinen huokospainekerroin suljetun leikkauslujuuden tulkinnalle
OCR	Ylikonsolidoitumisaste
q_c	Mitattu kärkivastus
q_T	Korjattu kärkivastus
s_u	Suljettu leikkauslujuus
SBT	Maalaji luokitus CPTU tuloksien perusteella (Soil Behaviour Type)
u_2	Välittömästi kartion takaa mitattu huokosvedenpaine
u_3	Kitkahylsyn yläpuolelta mitattu huokospaine
u_o	Vallitseva huokosvedenpaine
w_L	Juoksuraja
σ_o	Vallitseva vertikaalinen kokonaisjännitys
σ_{vo}	Vallitseva vertikaalinen kokonaisjännitys

1 Johdanto

1.1 CPTU-kairauskokeen käyttö ja edut

Noin 40 vuotta sitten kehitettiin ensimmäinen puristinkaira, jossa oli myös huokospainemittaus. Tämän 40 vuoden kuluessa CPTU-kairauskokeesta on kehittynyt tarkka tutkimusväline, jonka käyttömahdollisuudet ovat laajat. CPTU-kairauskokeita voidaan tehdä monentyyppisissä maalajeissa karkeasta soraa sisältävässä hiekasta hienorakeisiin maalajeihin. Menetelmä ei kuitenkaan ole sopiva, jos sorapitoisuus kasvaa liian suureksi, tai jos maalaji sisältää kiviä.

Pohjoismaissa varsinkin Ruotsissa ja Norjassa CPT:n ja CPTU:n käyttö on lisääntynyt vuosittain. CPTU-kairauskokeita ei käytetä vain maalajikerrosten tunnistamiseen vaan myös parametrien määrittämiseen pohjarakentamisessa, jopa pehmeissä savissa. Esimerkiksi 16–17 vuotta sitten siipikairaus oli yleisin suljetun leikkauslujuuden määrittämenetelmä kenttäkokeissa Norjassa, CPTU:ta käytettiin harvakseltaan. Kuitenkin, nykyisin trendi on käyttää CPTU:ta parametrien määrittämiseen pehmeissä savissa; siipikairaus määrän tiputtua olemattomiin. /18/

Luotettavien suunnitteluparametrien määrittämiseksi pehmeissä savissa on erityisesti kiinnitettävä huomiota kahteen asiaan CPTU-kairauskoetta tehdessä ja tuloksia tulokittaessa: ensiksi mittaustulosten täytyy olla tarkat ja edustavat, sekä toiseksi on käytettävä hyväksyttyjä parametrien määrittämenetelmiä. /18/ Tässä työssä keskitytään ensimmäisen kohtaan eli tarkkuuden parantamiseen hienorakeisissa maissa.

CPTU:n suurimmat edut /4/:

- Lähes jatkuva mittaustieto
- Toistettavuus ja luotettavuus
- Kustannustehokkuus

Tulosten käyttö projekteissa /7/:

Yleiset:

- Maalajikerrokset
- Maaluokitus
- Suljettu leikkauslujuus
- Hiekan suhteellinen tiiveys

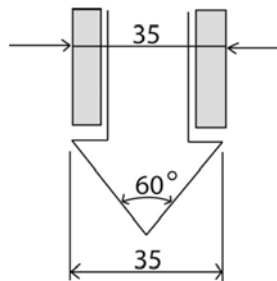
Harvemmin /7/:

- Muodonmuutos ja vedenjohtavuus parametrit
- Paalun kantavuuden arviointi
- Maan parantamisen monitoroiminen
- Maan juoksettumisen arviointi

1.2 Puristinkairauskoe mekaanisella mittauksella: historia ja kehitys

1.2.1 Vuosi 1932

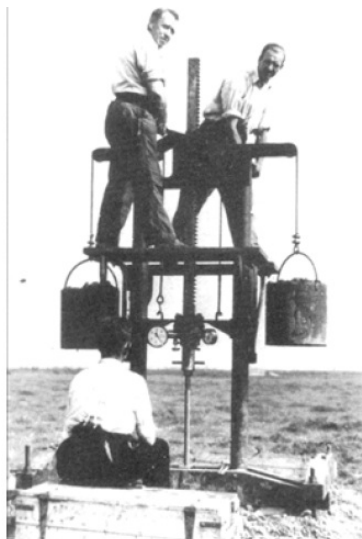
Vuonna 1932 tehtiin Hollannissa ensimmäinen mekaaninen puristinkairaus käyttäen halkaisijaltaan 35 mm kärkikartiota (Kuva 1). Kärkikartio vastasi hyvin nykyisin käytettävää yleisintä kärkikartion kokoa sillä kartion pohjan poikkipinta-alaksi muodostui 10 cm^2 sekä kartiokulmana käytettiin 60 astetta. Kairaus suoritettiin käyttämällä suoja-putkea sekä sisäputkea. /1, 4/ Sisäputken avulla kärkeä painettiin maahan. Painamiseen tarvittavaa voima mitattiin ja korjattiin tankojen painolla. Ulkoputken tarkoitus oli vähentää sisäputkeen kohdistuvaa tankokitkaa. /4/



Kuva 1. Varhainen mekaaninen kärkikartio /1/

1.2.2 Vuosi 1935

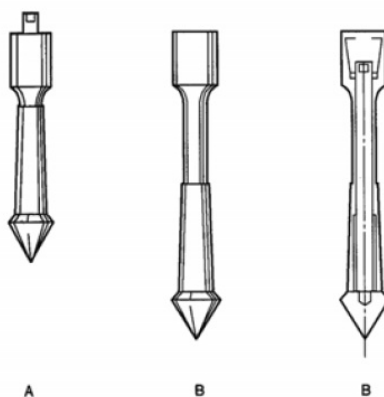
Delftin maamekaniikan laboratorio suunnitteli ensimmäinen manuaalikäyttöisen 10 t puristinlaitteen kärkikartion painamiseen (Kuva 2). /1, 4/ Mittauksessa painettiin ensin sisäputken avulla kärkeä alaspäin 150 mm ja mitattiin tähän tarvittava puristusvoima. Tämän jälkeen painettiin ulkoputkea saman verran alaspäin, kunnes ulkoputki saavutti kärkikartion. Kairausta jatkettiin molempia putkia painamalla alaspäin seuraavalle mittaussyvyydelle. /4/



Kuva 2. Ensimmäinen manuaalikäyttöinen puristinlaitteisto kärkikartiolle /1/

1.2.3 Vuosi 1948

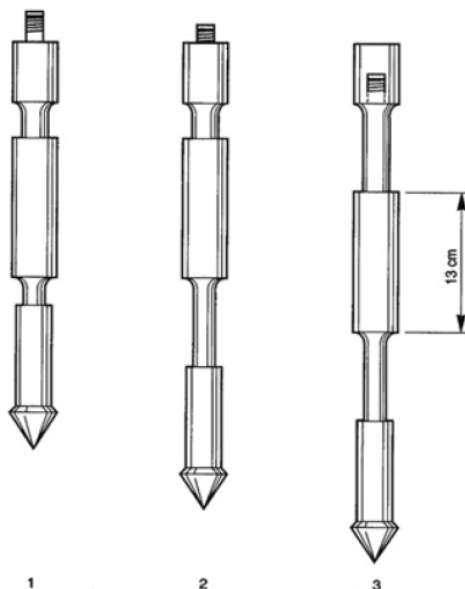
Alkuperäistä hollantilaista kärkikartiota parannettiin lisäämällä kartion yläpuolelle kartiomainen jatke (Kuva 3). Tämän tarkoituksena oli estää maan tunkeutuminen suo-
japutken ja sisäputken väliin. /1, 4/ Väliin tunkeutunut maa-aines aiheutti suo-
japutken ja sisäputken välisen kitkan suurenemista ja väärästi näin mitattua kärkivastusta.



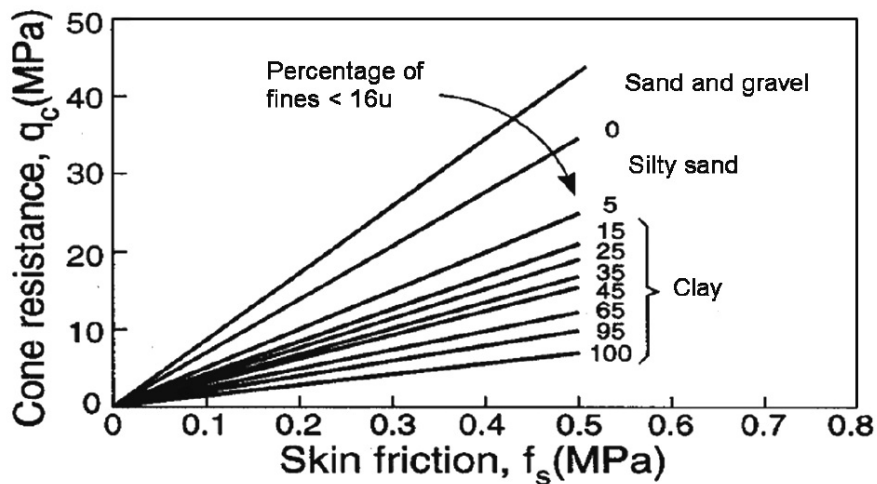
Kuva 3. Kartiojatke vähentämään tunkeutuneen maan aiheuttamaa kitkaa /1/

1.2.4 Vuosi 1953

Vaippakitkahylsy lisättiin kärjen yläpuolelle mittaamaan vaippavastuksen ja kärkivas-
tuksen yhteysvaikutusta (Kuva 4). Mittaus tehtiin 20 cm välein tai erikoistapauksissa
mittauksia voitiin tehdä 10 cm välein. Vaippavastuksen ja kärkivastuksen suhteella
voitiin ensimmäistä kertaa tulkita maalajityyppejä (Kuva 5). /1, 4/



Kuva 4. Vaippavastuksen mittaus osaksi kairausta /1/



Kuva 5. Maalaji tulkintaa kitkasuhteen avulla /1/

Useimmissa mekaanisissa puristinkairauksissa tarvittavaa voimaa mitattiin painemittarin avulla. Sisäputken ja painamiseen käytettävän laitteiston välissä oli sylinteri ja mäntä, jossa puristusvoima painoi mäntää alaspäin sylinterissä aiheuttaen näin öljynpainetta. Öljynpaine voitiin muuttaa mittarin asteikossa luettavaan muotoon bourdonputken avulla ja näin voitiin mittarista tarkkailla käytettävää puristusvoimaa jatkuvasti. Myöhemmässä vaiheessa puristuksen tapahduttua hydraulisesti puristusvoimaa voitiin myös mitata käytetystä hydraulikkapaineesta. Joka tapauksessa kärkeen kohdistuvan voiman mittaus tapahtui aina maanpinnalta käsin. Edelleenkin tämän tapaiselle mittaukselle on omat markkinansa laitteiston edullisuuden ansiosta. /4/

1.3 Puristinkairauskoe sähköisellä mittauksella: historia ja kehitys

Ensimmäinen sähköiseen mittaukseen perustuva kärkikartion puristinkaira eli CPT kehitettiin mahdollisesti Saksassa toisen maailmansodan aikoihin. Suurimmat parannukset mekaaniseen kärkeen verrattuna ovat:

- Poistavat suojaputken ja sisäputken välisestä kitkasta aiheutuneen vääristymän
- Jatkuva mittaus jatkuvalla painamisella ilman tarvetta liikuttaa välillä kairausvälineistön eri osia, jolloin ei-haluttu maan häiriintyminen väheni
- Helpompi ja luotettavampi sähköinen mittaus kärki- ja vaippavastukselle

1.3.1 Vuosi 1948

Ensimmäinen elektroninen kärki patentoitiin Hollannissa Bakkerin toimesta. /4/

1.3.2 Vuosi 1949–1957

Delftin maamekaniikan laboratorio kehitti elektronista kärkeä vuodesta 1949 lähtien. Vuonna 1957 he esittelivät ensimmäisen kärjen, missä vaippavastuksen mittaus tapahtui erikseen. /4/

1.3.3 Vuosi 1965

Fugro kehitti elektronisen kärjen, minkä muoto ja mitat määrittivät perusteet nykyisille kärjille ja standardeille. /1, 4/

1.3.4 Vuosi 1974

Ensimmäinen kärki, mihin oli lisätty huokosvedenpaineen mittaus (CPTU), esiteltiin vuonna 1974. Ensimmäisissä malleissa huokosvedenpaineen mittauksen sijainti, muodot ja suodattimet vaihtelivat laajasti. Asteittain käytäntö vaihtui enemmän standardisoiduksi ja suodattimen paikaksi ryhdyttiin suosittelemaan nykyisen kaltaista heti kärkikartion takana olevaa mittausta. Huokosvedenpaineen mittauksesta kävi ilmeiseksi, että kärkivastus pitää korjata huokosvedenpaineen vaikutuksen poistamiseksi erityisesti pehmeissä savissa. /1, 4/

1.3.5 Nykytilanne

Komponenttien kehityksen myötä myös mittaustarkkuus on parantunut vuosien kuluessa. Komponenttien koko on lisäksi pienentynyt, jonka takia kärkeen tai kärjen jatkeeksi on voitu lisätä monenlaisia lisälaitteita mittaamaan eri suureita, kuten:

- Kaltevuuden mittaus
- Geofonit (seisminen mittaus)
- Painemittari
- Kamera
- Radioisotooppi (gamma/neutroni)
- Sähkövastus/sähkönjohtavuus
- Dielektrisyys
- pH
- Hapettuminen/pelkistyminen
- Laser/UV indusoitu fluoresenssi (LIF/UVOST)
- Haihtuvien orgaanisten aineiden tunnistus (Membrane interface probe MIP)

Taulukossa 1 on esitetty eri kenttäkokeiden soveltuvuutta eri parametrien määrittämiseen. Soveltuvuus on luokiteltu, niin että merkintä A vastaa korkeata soveltuvuutta, B kohtuullista soveltuvuutta, C alhaista soveltuvuutta ja – ei soveltuvuutta. CPTU:n soveltuvuutta voidaan taulukon mukaisesti parantaa lisämoduulilla, kuten seismisen moduulin lisäyksellä.

1.3.6 Mittauksen luotettavuus

On hyvin tärkeää, että CPTU-mittausdata on niin luotettavaa kuin mahdollista. Paras tapa saavuttaa tämä on tehdä testi noudattamalla ohjeita. Eurostandardi vahvistettiin suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi vuoden 2013 alussa. Eurostandardin käännös CPTU:n osalta on tosin vasta valmistumassa, minkä takia Kairausopas 6:n ohjeistusta on edelleen yleisesti noudatettu. Kairausopas 6:ssa on myös käyty tarkemmin läpi työn suoritusta.

Vuonna 2002 suoritettiin tutkimus, jossa vertailtiin eri laitevalmistajien kärjillä mitattuja arvoja. Tutkimuksessa todettiin, ettei välttämättä päästä täysin samoihin mittaus tuloksiin, vaikka ohjeistuksia noudatetaan tarkasti. Tutkimus tehtiin Norjassa pehmeän saven testialueella Onsøy2:ssa. Tutkimukseen osallistui kuusi eri kärkivalmistajaa, joiden kärjillä tehtiin viisi kairauskoetta per kärkityyppi. Osa kärkivalmistajista käytti testeissä kahtakin eri kärkityyppiä tai puristinlaitteistoa. Yhteismääräksi muodostui näin ollen 45 kairauskoetta, josta yksi kairaus epäonnistui. Epäonnistuneen kairauksen tuloksia ei huomioitu tulosten käsittelyssä. Taulukossa 2 on esitetty esimerkkinä tyypillinen tulosten vaihtelevuus korjatulla kärkivastuksella ja mitatulla huokosvedenpaineella. /13/ Todettakoon, että viime aikoina kärkien mittaustarkkuus on parantunut laadukkaammilla komponenteilla sekä paremmalla kärjen rakenteen suunnittelulla, joten nykypäivänä tulokset voisivat poiketa aiemmasta.

Taulukko 2. Tyypillinen tulos CPTU-mittaustulosten vaihtelussa Onsøy2testialueella /13/

Depth, m	Corrected cone resistance, q_t			Measured pore pressure, u_2		
	Overall average (kPa)	Range sensors (%) 1)	Total range (%) 2)	Overall average (kPa)	Range sensors (%) 1)	Total range (%) 2)
10	589	±15.6	±16.5	452	±6.9	±12.8
20	898	±14.3	±14.9	681	±7.0	±13.2

1. Jokaisen kärkivalmistajan mittaustulosten keskiarvon vaihteluväli (Range sensors)
2. Jokaisen yksittäisen kairauskokeen tulosten vaihteluväli (Total range)

Taulukon 2 tulokset osoittavat, että mittaustulosten vaihteluväli korjatun kärkivastuksen osalta on suurempi kuin huokosvedenpaine mittausten vaihteluväli. Lisäksi tulosten perusteella huokospainemittauksen tulokset ovat vähemmän riippuvaisia käytetystä kärkityypistä kuin kärkivastuksen mittauksissa. Kappaleessa 1.6.1 on kerrottu tarkemmin eri kärkirakenteista kärkivastuksen mittauksen osalta. Täysin ei tiedetä, mistä tämä kärkivastusmittausten suurempi vaihteluväli johtuu, mutta yleensä mitatut huokosvedenpaineen arvot ovat prosentuaalisesti suurempia koko kuormitusalueesta kuin kärkivastuksen arvot pehmeissä maalajeissa. Usein mittauksissa on hankala mitata kuormitusalueen pienimpiä arvoja.

1.4 CPTU-kairauskoemenetelmä

CPTU-kairauskokeessa maahan puristetaan vakionopeudella ($20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm/s}$) kärkikartiota, jonka poikkipinta-ala on 1000 mm^2 ja kärkikulma 60° . Kairauksen aikana mitataan:

- Kärkivastus
- Vaippakitka
- Huokospaine
- Tunkeutumisvyvyys
- Kaltevuus (Eurostandardin myötä kaltevuuden mittausta oltava lähes kaikissa kairauksissa)

Mitattavat muuttujat rekisteröidään sähköisesti mittausvälin ollessa niin tiheä (n.0,01...0,02 m välein), että saavutetaan lähes jatkuvia mittauskäyriä. /3/

1.4.1 Työn suoritus lyhyesti

Alla on kuvattu lyhyesti työn suoritusvaiheet. Osa työvaiheista on tiedonsiirrosta tai kärjen rakenteesta riippuvaista, kuten suotimen ja kärjen kyllästys. Tämän takia alla vain mainitaan suoritusvaiheet käymättä tarkemmin sisältöä läpi. Tarkempi työvaihekuvaus löytyy esim. Kairausopas 6:sta. Jokainen työvaihe voi kuitenkin vaikuttaa kairauksen onnistumiseen. Siksi myös CPTU-kärkien valmistajat myyvät apuvälineitä joidenkin vaiheiden helpottamiseen, kuten kyllästyslaitteita kärjen kyllästämiseen alipaineen avulla (huokossuotimelliseen kärkeen) tai lämpötilantasaus laatikoita eli käytännössä matkajääkaappeja.

Tarkistukset:

- Kalibroinnin voimassa olo
- Valitun kärjen kuormitusalueen sopivuus olosuhteisiin
- Kairauslaitteiston tarkistus ja sen toiminta kohteessa
 - Suodatin, kairatangot, tiivisteet ja raot, kulumiset ja sovitteet, varmuustoiminnot

Alkuvalmistelut:

- Riittävä etäisyys muihin tutkimuspisteisiin CPTU-kairauskokeella on yleensä 2 m. Ilma- tai vesihuuhtelulla tehtyihin kairausreikiin nähden vaadittu etäisyys voi olla suurempikin.
- Alkukairausreikä kuivakuorikerroksen tai karkean täytekerroksen läpi
- Puristinlaitteiston valmistelut ja puomin suoruuden tarkistus aina ennen kairauksen aloitusta. Kairatankojen poikkeama pystysuorasta olisi oltava alle 2 astetta.
- Suodattimen ja kärjen asennus ja nestetäyttö
 - Tärkein vaihe onnistumisen kannalta!
- Kärjen lämpötilan tasaus maanlämpötilaan
 - Esim. kärjen upottaminen vedellä täytettyyn alkukairausreikään ennen alkunollalukemien lukemista
- Alkunollalukemien luku
 - Kärjen oltava kuormittamattomassa tilassa

Kairauksen suoritus:

- Kairauksen aloitus välittömästi lämpötilatasauksen ja alkunollalukemien ottamisen jälkeen
- Kärjen laskeminen maanpinnan tasoon tai alkukairausreiän pohjalle
- Kärjen puristaminen vakionopeudella 20 mm/s (± 5 mm/s)
- Tunkeutumisvyödyden manuaalinen tarkkailu ja huomioiden ylös kirjaaminen

Lopputyöt:

- Kärjen ylös nostaminen
- Lopun nollalukemien lukeminen välittömästi noston jälkeen, ettei kärjen lämpötila ehdi muuttua
 - Kärjen kevyt putsaus sallittu ennen loppunollalukemien lukemista, jotta nollalukemat vastaavat kuormittamatonta tilaa
- Vaurioiden ja kulumien tarkistus
- Kairauspisteen koordinaattimittaukset tai pisteen merkintä
- Putsaukset ja huolto
- Mittausdatan tarkistus ylikuormituksen osalta

1.4.2 Käyttöluokat

Eurostandardin mukaan maaperäolosuhteista johtuvat vaatimukset jaetaan käyttöluokkiin taulukon 3 mukaisesti. Pienin sallittu tarkkuus tarkoittaa toisin sanoen suurinta sallittua epätarkkuutta, joka voidaan vielä hyväksyä. Sarakkeen arvoista suurempi virheen arvo sallitaan mitatussa arvossa. Tämä tarkoittaa esim. käyttöluokka 1:ssä kärkivastuksen osalta, että mittausalueella 0–700 kPa hyväksyttävä virhe voi olla 35 kPa. Yli 700 kPa kärkivastuksilla hyväksytään 5 % virhe eli mitattu arvo saa maksimissaan poiketa oikeasta arvosta 5 %. Hyväksyttävä virheen arvo sisältää kaikki virhelähteet, kuten sisäisen kitkan, tiedonkeruun virheet, epäkeskisen kuormituksen, lämpötilan (ympäristön lämpötilan ja hetkellisen lämpötilan) aiheuttamat vaikutukset ja mittavirheet /g/. Käyttöluokat ovat lähinnä käytettävyyssuokkia, joiden luokitus määräytyy maaperäolosuhteiden ja mittaustulosten käytön mukaan. TE2 koetyyppi vastaan CPTU-kairauskoetta ja TE1 CPT-kairauskoetta.

Taulukko 3. Käyttöluokat /9, alustavan eurostandardikäännöksen mukaan/

Käyttöluokka	Kokeen tyyppi	Mitattava parametri	Sallittu vähimmäistarkkuus ^a	Mittausten välinen enimmäispituus	Käyttö	
					Maa-aines ^b	Tulkinta tai arviointi ^c
1	TE2	Kärkivastus	35 kPa tai 5 %	20 mm	A	G, H
		Vaippakitka	5 kPa tai 10 %			
		Huokospaine	10 kPa tai 2 %			
		Kaltevuuskulma	2°			
		Tunkeutumispituus	0,1 m tai 1 %			
2	TE1 TE2	Kärkivastus	100 kPa tai 5 %	20 mm	A B C D	G, H* G, H G, H G, H
		Vaippakitka	15 kPa tai 15 %			
		Huokospaine ^d	25 kPa tai 3 %			
		Kaltevuuskulma	2°			
		Tunkeutumispituus	0,1 m tai 1 %			
3	TE1 TE2	Kärkivastus	200 kPa tai 5 %	50 mm	A B C D	G G, H* G, H G, H
		Vaippakitka	25 kPa tai 15 %			
		Huokospaine ^d	50 kPa tai 5 %			
		Kaltevuuskulma	5°			
		Tunkeutumispituus	0,2 m tai 2 %			
4	TE1	Kärkivastus	500 kPa tai 5 %	50 mm	A B C D	G* G* G* G*
		Vaippakitka	50 kPa tai 20 %			
		Tunkeutumispituus	0,2 m tai 2 %			

Taulukko 4. Käyttöluokkien selitteet /9, alustavan eurostandardikäännöksen mukaan/

Käyttöluokka	Kokeen tyyppi	Mitattava parametri	Sallittu vähimmäistarkkuus ^a	Mittausten välinen enimmäispituus	Käyttö	
					Maa-aines ^b	Tulkinta tai arviointi ^c
^a	Mitatun parametrin sallittu vähimmäistarkkuus on kahdesta ilmoitetusta arvosta suurempi. Suhteellinen tarkkuus koskee mitattua arvoa eikä mittausaluetta.					
^b	Standardin ISO 14688-2 [1] mukaisesti:					
	A homogeenisesti kerrostuneet maat, joissa on erittäin pehmeästä jähkkyään vaihtelevaa savea ja siltiä (yleensä $q_c < 3$ MPa)					
	B kerrokselliset maat, joissa on pehmeästä jähkkyään vaihtelevaa savea (yleensä $q_c \leq 3$ MPa) ja keskitiivistä hiekkaa (yleensä $5 \text{ MPa} \leq q_c < 10 \text{ MPa}$)					
	C kerrokselliset maat, joissa on jähkkyä savea (yleensä $1,5 \text{ MPa} \leq q_c < 3 \text{ MPa}$) ja hyvin tiivistä hiekkaa (yleensä $q_c > 20 \text{ MPa}$)					
	D hyvin jähkästä kovaan vaihteleva savi (yleensä $q_c \geq 3 \text{ MPa}$) ja hyvin tiiviit karkeat maat ($q_c \geq 20 \text{ MPa}$)					
^c	G maakerrosprofilointi ja maalajien tunnistaminen, joihin liittyy alhainen epävarmuustaso					
	G* viitteellinen maakerrosprofilointi ja maalajien tunnistaminen, joihin liittyy korkea epävarmuustaso					
	H geoteknisten parametrien tulkinta, johon liittyy alhainen epävarmuustaso					
	H* viitteellinen geoteknisten parametrien tulkinta, johon liittyy korkea epävarmuustaso					
^d	Huokospaine voidaan mitata vain TE2-typin menetelmällä.					

Aiemmissa tutkimuksissa saatujen tulosten perusteella suurikapasiteettisen kärjen mahdollisuutta täyttää käyttöluokan 1 vaatimukset pienillä vastuksilla on syytä epäillä, vaikka valmistaja ilmoittaisikin papereissaan kärjen tarkkuudeksi käyttöluokan 1 vaatimukset. Vaatimukseen pääseminen voi edellyttää kuormitusalueen rajaamista suppeammaksi. Tätä asiaa käsitellään lisää kappaleessa 1.6.8.

1.5 Tulosten tulkinta

Kokonaisvaltaisen CPTU-tulosten tulkintaan perustuvat kaavat edellyttävät kaikkien kolmen mittauksen onnistumista.

1.5.1 Suljetun leikkauslujuuden tulkinnan teoria CPTU-mittaustuloksista

Suljetun leikkauslujuuden tulkinnan teorialat voidaan jakaa viiteen eri luokkaan /4/:

- 1) Kantavuusteoria
- 2) Laajenemisteoria
- 3) Energian säilymislaki yhdistettynä laajenemisteoriaan
- 4) Analyttiset ja numeeriset ratkaisut käyttäen lineaarista tai epälineaarista jännitys-muodonmuutos riippuvuutta
- 5) Siirtymäpolkuteoria

Tulkintojen pohjalta on johdettu suljetulle leikkauslujuudelle (s_u) ja korjatulle kärkivastukselle (q_T , selitetty kappaleessa 1.6.2) tai mitatulle huokosvedenpaineelle (u_2) riippuvuus /4/:

$$q_T = N_c \cdot s_u + \sigma_o$$

$$u_2 = N_{\Delta u} \cdot s_u + u_o$$

Jossa N_c on teoreettinen kärkekerroin ja σ_o vallitseva vertikaalinen kokonaisjännitys. Teoriasta riippuen σ_o :n merkintänä voidaan käyttää myös σ_{vo} . Vallitsevan vertikaalisen kokonaisjännityksen sijaan käytetään toisinaan vallitsevaa horisontaalista kokonaisjännitystä σ_{ho} tai keskiarvoista kokonaisjännitystä σ_{mean} . /4/ $N_{\Delta u}$ on teoreettinen kärkekerroin huokospaineelle ja u_o vallitseva huokosvedenpaine.

Kantavuusteoriaan pohjautuvissa tulkinnoissa käytetään teorian lähtöoletuksia maan käyttäytymisestä jäykkänä ideaaliplastisena materiaalina. Ennen murtoa tapahtuvia muodonmuutoksia ei huomioida. Kantavuuden arvo on hyvin riippuvainen oletetusta liukupinnasta. /4/

Laajenemisteoriaan perustuvassa tulkinnassa maa käyttäytyy elastoplastisesti ja laajenemisen on oletettu tapahtuvan pallomaisesti. Kärkekerrointa voidaan arvioida paineesta, joka vaaditaan maan pallomaiseen laajentumiseen, jolloin kärkivastus johtuu vertikaalisen kokonaisjännityksen sijaan oktaedrijännityksestä. /4/

Laajentumisteorian ja energian säilymislain yhdistävässä teoriassa oletetaan, että kärjen painamisessa tehtävä työ tietyllä matkalla on yhtä suuri kuin kärjen painamiseen kulunut energia vakionopeudella samalla matkalla ja tehty työ vastaa laajentumista. Laajentuminen tapahtuu sylinterimuotoisesti. /4/

Jännitys-muodonmuutos tulkinnassa kärjen kuormituksen aiheuttama murtopinta on jaettu suoriin, missä murren oletetaan tapahtuvan. Kolmiaksaalikokeilla näytteiden murtuminen on voitu tehdä suorien suunnassa ja ratkaista näin empiirisesti suljetun leikkauslujuuden ja kärkivastuksen yhteys. /4/

Muodonmuutosmenetelmässä oletetaan materiaalin ohittavan paikallaan pysyvän kärjen ja tästä johtuvat muodonmuutospolut voidaan määrittää. Muodonmuutoksien syntymiseen vaikuttaa maan suljettu leikkauslujuus, tehokas vertikaalinen jännitys, lepopaine kerroin, suhteellinen jäykkyys ja kärjen karkeus. /4/

Koska jokaisessa näissä teorioissa on omat yksinkertaistukset ja oletukset, niin teoreettisesti määritetyt kärkekertoimet ovat tarvinneet varmistukseksi joukon kenttä- ja laboratoriokokeita. Näin ollen empiirisiä korrelaatioita kärkekertoimista pidetään varmempina, mutta kuitenkin teoreettiset ratkaisut tarjoavat hyvän pohjan ymmärtämiselle. /4/

Näihin teorioihin perustuen on empiiristen kokemusten pohjalta muodostunut kolme tapaa arvioida suljettua leikkauslujuutta:

- 1) S_u :n arvioiminen kokonaiskärkivastuksesta
- 2) S_u :n arvioiminen tehokkaasta kärkivastuksesta
- 3) S_u :n arvioiminen mitatusta huokosvedenpaineesta

Suomessa CPTU-tutkimuksia on ollut tähän mennessä kohtuullisen vähän. Useimmat työt käsittelevät suljetun leikkauslujuuden osalta vain leikkauslujuuden tulkinnan paikkansa pitävyyttä yhdellä tai kahdella tulkintakaavalla. Kairausopas 6:ssa on esitetty ruotsalaisten käyttämä suljetun leikkauslujuuden tulkintakaava kärkivastuksesta normaalikonsolidoituneelle hienorakeiselle maalle. Ruotsalaisten omassa päivitetys-oppaassa on myös esitetty huokospainemittaukseen perustuva tulkinta normaalikonsolidoituneelle hienorakeiselle maalle sekä kärkivastuksen tulkintakaava on päivitetty myös ylikonsolidoitumisen huomioonottavaksi. /20/ Aiemman tutkimuksen perusteella kärkivastuksen ja huokospainemittauksen tulkinnat näyttäisi antavan lähemmäksi oikean suljetun leikkauslujuuden arvon suoralle leikkauslujuudelle Perniön pehmeälle savelle Salossa /19/. Mahdollisesti suljettu leikkauslujuus on näiden kahden tulkinnan välissä. Yleisesti Suomessa käytetään stabiliteetin laskentaan lamellimenetelmässä suoraa leikkauskoetta vastaavaa suljettua leikkauslujuutta, joka on myös lähes sama kuin redusoitu siipikairauستulos. Alla on esitetty kaksi ruotsalaisen käyttämää tulkintakaavaa suljetun leikkauslujuuden laskemiselle.

Ensimmäinen suljetun leikkauslujuuden tulkintakaava perustuu korjattuun kärkivastukseen q_T , vallitsevaan kokonaisjännitykseen σ_{v0} sekä N_c kertoimen sovitukseen juoksurajan w_L avulla. Kaava ottaa myös huomioon maan ylikonsolidoitumisasteen (b =materiaaliparametri, tyypillisesti 0,8).

$$S_u = [(q_T - \sigma_{v0}) / (13,4 + 6,65 * w_L)] * (OCR / 1,3)^{b-1}$$

Toinen suljetun leikkauslujuuden tulkintakaava perustuu mitattuun huokospaineeseen u_2 , vallitsevaan huokospaineeseen u_0 sekä $N_{\Delta u}$ kertoimen sovitukseen juoksurajan w_L avulla normaalikonsolidoituneelle hienojakoiselle maalle. Kaava sopii vain normaalikonsolidoituneelle ja lievästi ylikonsolidoituneelle hienojakoiselle maalle.

$$S_u = (u_2 - u_0) / (14,1 - 2,8 * w_L)$$

1.6 CPTU-kairauskokeen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ja virheitä

Tässä luvussa on listattuna asioita, mitkä pitää ottaa huomioon CPTU-kairauskoetta tehdessä sekä tuloksia tulkittaessa. Huokospaineen mittaus tapahtuu suositusten mukaisesti heti kärkikartion yläpuolelta.

Käyttöluokan vaatimusten täyttyminen voi edellyttää monia korjauksia, joita on esitelty tässä selvityksessä. Kaikki, varsinkin raakadataan/teklaan tehtävät korjaukset, on kirjattava ylös ja toimitettava aina mittausdatan mukana eteenpäin. Suositeltavaa on kuitenkin korjata virheet erilliseen tiedostoon, jotta alkuperäinen tieto säilyy koskemattomana.

Useimmissa tapauksissa tietokantaan tallennettu tekla ei ole riittävä kaikkien tietojen kirjaukseen ja eteenpäin toimittamiseen. Eurostandardin myötä toimitettavan tiedon määrä onkin kasvanut entisestään. Usein raakadataan käsiksi pääseminen on lähes mahdotonta jälkikäteen, minkä takia myöhemmin tuloksia tarkastellessa joudutaan käyttämään vain teklaa tietoa. Tämän takia vanhojen CPTU-kairausten mittausdataan kannattaa suhtautua kriittisesti, jos aikoo tulkita tuloksista parametreja.

1.6.1 Kärkivastuksen ja vaippavastuksen mittausanturit

Sähköisten puristinkairauskokeiden, kuten CPTU:n, mittaus perustuu voima- sekä paineantureihin. Tässä osiossa selitetään aluksi yleisesti kuinka voima saadaan muutettua sähköiseksi mitattavaksi suureeksi voima-anturin avulla. Voima-anturit toimivat yleensä tietyllä kuormitusalueella sekä tietyssä lämpötilassa lähes lineaarisesti. Usein laitteiston toiminta-alue rajataan tälle lineaariselle alueelle riittävän mittaus-tarkkuuden saavuttamiseksi.

Mitattava kuormitusvoima ohjataan kappaleen läpi, mihin voima-anturi on kiinnitetty. CPTU-kärjessä esim. kärkikartioon kohdistuva tunkeumavastuksesta aiheutuva voima johtuu kärjen sisällä olevaan sylinterimäiseen metallivarteen (kuvassa 6, kärkivastuksen anturit kiinnitetty punaisella ja valkoisella johdolla). Kuormitusvoima aiheuttaa metallivarteen elastisia muodonmuutoksia, mitkä aiheuttavat myös voima-anturiin pientä puristumaa. Voima-anturi koostuu useimmiten siltakytketyistä venymäliuskoista, joiden sähköjohtavuus muuttuu, kun liuskassa olevien johteiden poikkileikkaus muuttuu venymisestä/puristumisesta. Tästä syntyvä jännite-ero on suuruudeltaan millivolteja ja tämän takia se vaatii usein vahvistimen vahvistamaan signaalia. Vahvistettu signaali muutetaan analogisesta digitaalseksi muotoon. Mittausas-teikko on jaettu muuntimen resoluution mukaiseen määrään jännitetasoja. Resoluution perusteella määräytyy laitteiston erottelukyky. A/D-muunnoksen jälkeen signaalin käsittelyllä poistetaan tarvittaessa häiriöitä ja muutetaan signaali ymmärrettävään muotoon. Tämä tapahtuu kalibrointikertoimen avulla, kun tunnetaan sähköjohtavuuden muutoksen ja voiman riippuvuus. Tällöin myös mitattu voima muutetaan vastaamaan jännitystä eli voiman vaikutusta pinta-alaa kohden. Venymäliuskojen sijasta CPTU:ssa käytetään toisinaan myös induktiivisia tai pietsosähköisiä antureita. Kuvassa 6 on A.P. van den Bergin valmistamat kärjet, joista alemmassa esittelykärjessä venymäliuskat ovat esillä vaippa- ja kärkivastuksen mittauksen osalta. Kuvassa 7 on esillä kärjen takaosan piirilevy analogisen signaalin mittaukseen, käsittelyyn ja digitalisoimiseen.



Kuva 6. Yllä avatun kärjen rakenne, alla esittelykärjen rakenne, josta näkee metallivarteen asennetut venymäliuskat. Valkoisella ja punaisella johdolla kytketty kärkivastuksen anturit sekä keltaisella ja vaaleanpuneisella vaippakitkan anturit.

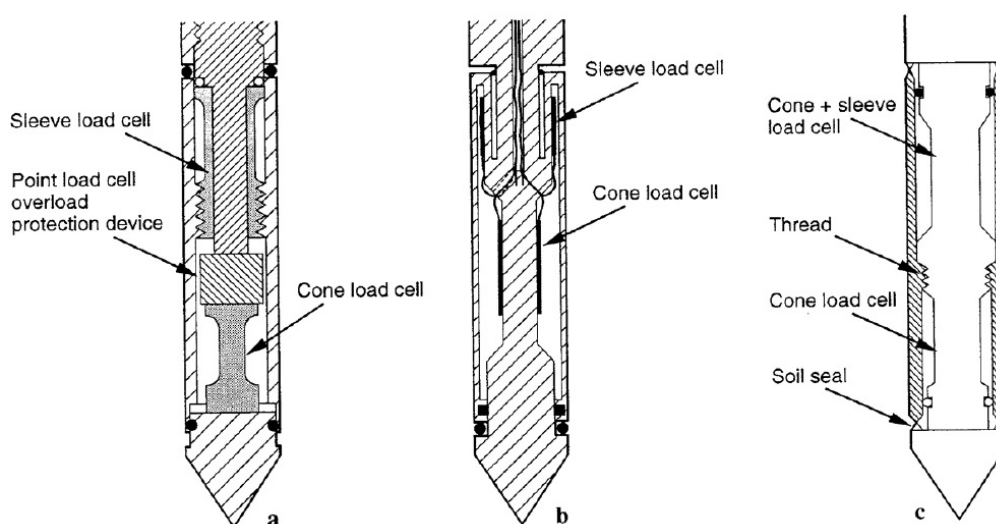


Kuva 7. Kärjen takaosassa oleva piirilevy analogisen signaalin mittaukseen, käsittelyyn ja digitalisoimiseen

Kärkivastuksen arvo saadaan jakamalla mitattu voima kärjen pinta-alalla 10 cm^2 . Kärkivastuksen ajatellaan vastaavan kantavuuden maksimiarvoa. Vaippavastus saadaan vastaavasti jakamalla vaippahylsyyn kohdistuva voima vaipan pinta-alalla 150 cm^2 . /2/ Jatkossa ajatellaan voima-anturin mittaavan suoraan jännitystä/kuormaa, mikä siis saadaan, kun kerrotaan voiman muutos kalibrointikertoimella.

Useimmiten, yhdellä kärkirakenteella ei voida täyttää kaikkia vaatimuksia ja tarpeita. Joustavalla kärjen suunnittelulla voidaan muuttaa kärjen rakennetta sopivaksi eri maalajien vaatimusten mukaisesti. Suuren kapasiteetin omaavilla kärjillä (kärjen rakenne kestää esim. 98 kN voiman) on yleensä tarkoitus suorittaa alustava maaperäkairaus sekä saada kokonaisvaltainen kuva kaikista maalajikerroksista. Sen lisäksi suurikapasiteettisella kärjellä voidaan kitkamaalajeissa arvioida mm. maan kitkakulmaa sekä tiiveyttä. Voima-antureita käytetään pääosin kolmella eri tapaa kuvan 8 mukaisesti, joko mittaamaan vaippakitkaa ja kärkivastusta erillisillä voima-antureilla puristuksesta tai vedosta tai sitten mittaamalla kahta eri parametria samalla anturilla. Viimeisintä mittaustyyppiä käytetään vain suuren kapasiteetin mahdollistamiseksi. Toteutuksessa käytetään kahta suuren kapasiteetin omaavaa voima-anturia: ensimmäinen voima-anturi mittaa pelkästään kärkivastusta sekä toinen voima-anturi kärkivastuksen ja vaippavastuksen yhteisvaikutusta. Vaippavastus saadaan vähentämällä toisesta voima-anturista ensimmäisen voima-anturin mittaama vastus. Herkissä kärjissä vaippahylsyyn ja kärkikartioon vaikuttavat voimat mitataan itsenäisillä voima-

antureilla. Suurikapasiteettiset kärjet voidaan myös toteuttaa tällä tavoin materiaali paksuuksia kasvattamalla. Vaippavastuksen mittauskapasiteetti on yleensä luokkaa 1/10 kärkivastuksen kapasiteetista, joten itsenäisillä voima-antureilla voidaan vaikuttaa suuresti mittaustarkkuuteen käyttämällä herkempiä mittauskomponentteja antureissa halutulle mittausasteikolle. Molemmilla kärkityypeillä on omat käyttökohteensa. Suuren kapasiteetin omaavaa kärki vaurioituu tai ylikuormittuu harvoin, kun taas herkkä kärki on alttiimpi vaurioille ja ylikuormituksille. /2/



Kuva 8. Kärkien eri rakenteita a.) Kärki- ja vaippavastus puristusta b.) Kärkivastus puristusta ja vaippavastus vetoa c.) Kärkivastus omasta voima-anturista sekä vaippavastus kärkivastuksen ja vaippavastuksen summasta erotuksena /4/

Jos pehmeitä kerroksia on havaittu suurikapasiteettisella kärjellä ja tutkimukset vaativat tarkempaa tietoa niistä, voidaan tutkimus tehdä herkemällä kärjellä pehmeän maakerroksen syvyydellä. Kun tutkimuksissa valitaan sopivan herkkyyinen kärki maan mukaan, voidaan näin saavuttaa optimaalinen mittaustarkkuus. /2/

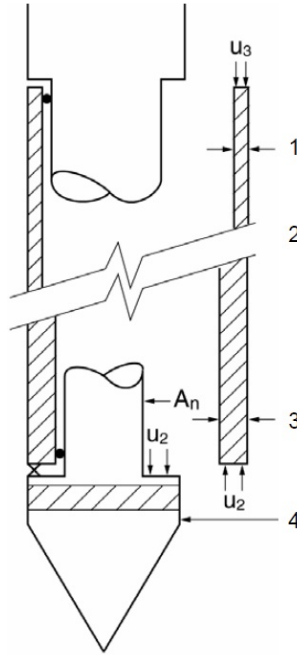
1.6.2 Kärkivastuksen ja vaippavastuksen korjaus

CPTU-kairauskokeissa mitattavat kärkivastus ja vaippavastus ovat ns. korjaamattomia mittausparametreja. Kärki- ja vaippavastuksen mittaustulokseen vaikuttaa myös muodostuneen huokosvedenpaineen kohdistama voima, mikä korjataan pois ennen tulosten tulkintaa, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia eri kärkien välillä. Varsinkin hyvin pehmeissä savimaissa, muodostuneen huokosvedenpaineen vaikutus on hyvin suuri. Kuvassa 9 on esitetty huokosvedenpaineen vaikutus mittauksessa. Kärkivastuksen kohdalla mitattu arvo on pienempi kuin mitä maan todellinen kokonaisvastus on. Huokospaineen vaikutus vaippavastuksen arvoon riippuu pääosin huokospaineesta vaippahylsyn ala- ja yläpäässä sekä vaippahylsyn päissä olevista pinta-aloista. Tämän lisäksi vaippavastukseen vaikuttaa myös O-renkaiden sisäisestä kitkasta. Korjauskertoimet (=pinta-alakertoimet) määritetään paineistetussa sellissä, jonka avulla voidaan kärkivastuksen korjauskerroin määrittää sekä arvioida huokospaineen vaikutusta vaippakitkan mittaukseen. Vaippavastuksen korjaaminen yhdellä kertoimella ei todellisuudessa onnistu, sillä huokosvedenpaine on harvoin sama hylsyn ylä- ja alapäässä. Huokospaineen ero kasvaa varsinkin, kun ylä- ja alapää ovat eri maalajissa. Käyttämällä laitteistoa, jossa hylsyn ylä- ja alapään pinta-alat ovat samat, voidaan helpommin määrittää huokospaineen vaikutus vaippavastukseen. /2/

Alla on esitetty kärkivastuksen korjauskaava:

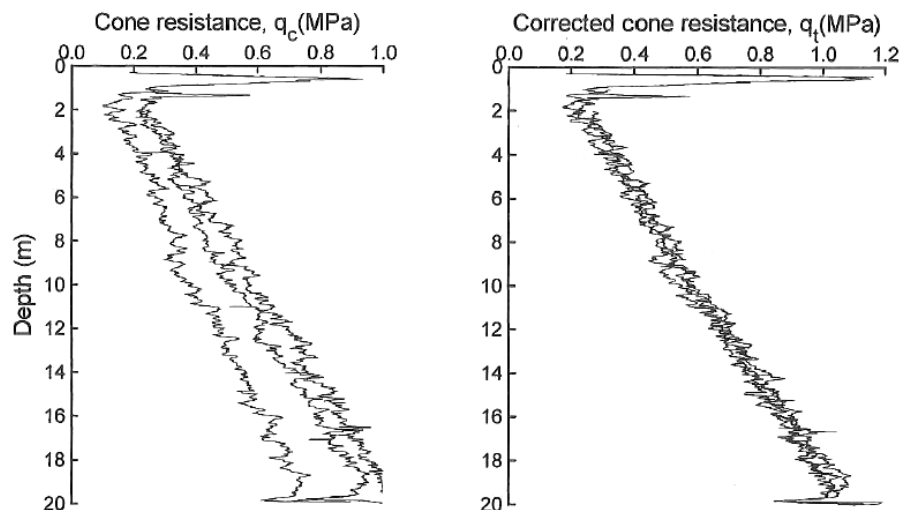
$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

- q_t = Korjattu kärkivastus, MPa
 q_c = Mitattu kärkivastus, MPa
 a = Kärjen nettopinta-alasuhte (kärjen pinta-alakerroin)
 A_n = Kärkikartioon kohdistuvia voimia välittävän varren poikkipinta-ala suotimen kohdalla, mm²



Kuva 9. Huokospaineen vaikutuksen korjaus vaippa- ja kärkivastukseen 1) Vaippahylsyn yläpään poikkipinta-ala 2) Vaippahylsyn pinta-ala 3) Vaippahylsyn alapään poikkipinta-ala 4) Kärkikartion poikkipinta-ala /9/

Kuvassa 10 on esitetty esimerkkinä mitatut kärkivastukset ja korjatut kärkivastukset kolmella eri kärjellä. Kairaukset on tehty samassa kohteessa, mutta kärkien korjauskerroin a vaihtelee välillä 0,59–1.



Kuva 10. Mitatut kärkivastukset ja korjatut kärkivastukset /4/

Korjattu vaippakitka voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä /9/:

$$f_t = f_s - (u_2 \cdot A_{sb} - u_3 \cdot A_{st}) / A_s$$

f_t	=	Korjattu vaippakitka, MPa
f_s	=	Mitattu vaippakitka, MPa
A_s	=	Kitkahylsyn pinta-ala, mm ²
A_{sb}	=	Kitkahylsyn pohjan poikkipinta-ala, mm ²
A_{st}	=	Kitkahylsyn yläosan poikkipinta-ala, mm ²
u_2	=	Kitkahylsyn ja kärkikartion väliltä mitattu huokospaine, MPa
u_3	=	Kitkahylsyn yläpuolelta mitattu huokospaine, MPa

Useimmiten mitataan vain huokospaine u_2 kärkikartion ja vaippahylsyn välistä. Huokospainetta u_3 voidaan arvioida tällöin alla olevan kaavan mukaisesti /8/:

$$u_3 \approx 0,7 \cdot (u_2 - u_0) + u_0 = 0,7 \cdot \Delta u_2 + u_0$$

Eurostandardin mukaan vaippavastuksen korjausta suositellaan tehtäväksi yllä olevan kaavan mukaisesti, mutta tavallisesti käytetään korjaamatonta vaippavastusta.

1.6.3 Nollalukemat

Ennen ja jälkeen CPTU-kairauskoetta suoritetaan mittauslaitteiston nollalukemien lukeminen kuormittamattomassa tilassa. Nollalukemien lukemisen aikana kärjen on riiputtava vapaasti. Lisäksi ennen alkunollalukeman lukemista pitää kärjen lämpötila olla mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa, kuten myös lämpötilavaikutuksia käsittelevässä kappaleessa on tarkemmin kerrottu. Alkunollalukema asettaa nollatason, mihin verrataan kuormituksesta aiheutuvaa jännitemuutosta voima-anturissa. Kairauksen jälkeinen nollalukema auttaa arvioimaan kairauksen onnistumista. Loppunollalukema on otettava niin pian kuin mahdollista, kun kärki on nostettu takaisin maanpinnalle. Tarvittaessa voidaan kuitenkin ensin poistaa varovasti kärkeen tarttunut maa-aines kuormaa aiheuttamasta. Hienorakeisissa maissa hienoaines tukkii usein suodinta, mikä näkyy loppunollalukemassa huokosylipaineena. Toisinaan myös kärjen ylös vetäminen aiheuttaa alipaineen, mikä ei ehdi tasaantumaan, mikäli kärkeen on jäänyt maa-ainesta. Pääosin kärki- ja vaippavastuksen nollalukemien erotuksesta

eli nollalukemien poikkeamasta voidaan arvioida kairauksen onnistuminen. Nollalukeman poikkeaminen voi johtua mm. lämpötilan muutoksesta alkunollalukeman lukemisen jälkeen, kärjen huonosta huoltamisesta tai kärjen ylös nostamisesta tapahtuvasta imuvaikutuksesta.

Jos nollalukemat on luettu ennen ja jälkeen testin, nollalukeman poikkeama voidaan laskea. Usein, nollalukeman poikkeama on hyvä merkki testin laadusta. Poikkeama koostuu monesta eri tekijästä: /2/

1. Ulostulon vakaudesta
2. Lämpötilan muutoksesta testin aikana
3. Maa-aineksen tunkeutumisesta kärkeen
4. O-renkaiden aiheuttamasta kitkasta
5. Kosteuden tunkeutumisesta kärkeen
6. Ylikuormituksesta ja sen aiheuttamasta kalibroinnin menetyksestä
7. Kärjen taipumisesta tai paikallisesta myötäämisestä

Nollalukemien poikkeamaa voidaan vähentää huolellisuudella ja ohjeiden noudattamisella maastossa. Nollamittauksen arvo on muuttuva suure ja se määritetään juuri ennen jokaista kairauksia sekä välittömästi kairauksen jälkeen. Kärjen kalibroinnissa nollalukemien poikkeama kalibroitukuormituksen lopussa, pitäisi olla alle 0,05 % täydestä mittausasteikosta. /2/

Nollalukemien mittauksen olosuhteet tulisi aina olla nähtävissä tallennetun datan kanssa, jotta tiedon käyttäjä voi arvioida sen vaikutusta mittauksiin. Nollalukemien poikkeaman ei pitäisi, yleisesti, ylittää 0,5–1,0 % täydestä mittausasteikosta. Pehmeiden maiden mittauksissa, virheen pitäisi olla huomattavasti vähemmän kuin 0,5 % täydestä asteikosta. /2/ Usein nollalukemat tallennetaan raakadatan eli millivoltteina kairaustiedostoon. Tämän takia datan lähetyksen yhteydessä pitäisi myös kalibroitukertot olla ilmoitettuna, jotta millivoltit voidaan muuttaa pascalleiksi kairauksen onnistumisen arviointia varten.

Voima-anturit uusimmissa CPTU-kärjissä on yleensä varustettu lämpötilan muutoksen kompensoinnilla tietyille lämpötila-alueelle. Hyvällä lämpötila kompensoinnilla voidaan virheen arvo rajata noin 0,05 % täydestä asteikosta. Kuitenkin lämpötilan tasaaminen pitää tehdä, kuten aiemmin on jo ohjeistettu. /2/ Lämpötilakompensointi toteutetaan yleensä sijoittamalla kaksi anturia, mutta toinen tulee kiinnittää niin, ettei siihen muodonmuutos vaikuta, vaan ainoastaan lämpötila (asennetaan reagointisuuntaansa nähden poikittain) /23/.

1.6.4 Lämpötilavaikutukset

Mittausantureiden nollalukemiin vaikuttaa, missä lämpötilassa nollalukemat on otettu sillä venymäliuskien toiminta perustuu sähkönjohtavuuteen, joka on lämpötilariippuvainen. Lämpötilan muuttuessa myös CPTU-kärjen rakenteesta riippuen lämpötilan muutos nollalukemien lukemisen jälkeen voi näkyä nollatasosta poikkeavana kuormitusarvona. Sen takia nollalukemien lukeminen pitää tehdä mahdollisimman lähellä maan lämpötilaa, joka on etelä-suomessa 6...8 astetta ja pohjois-suomessa 2..4 astetta. CPTU-kairauskokeen alussa lämpötilan tasaaminen tapahtuu vedellä täytetyn alkureiän avulla. Vedellä täytetyn alkureiän tarkoituksena on myös estää varsin kiin huokossuotimella varustetussa kärjessä ilman pääseminen huokosiin. CPTU-kärjen lämpötilan annetaan tasaantua valmistajan ilmoittaman ajan verran /9/. Läm-

pötilan muutoksen vaikutukset tulisi olla määritettynä uuden karkiosan kalibroinnissa, mistä saa käsityksen yhden celsius asteen muutoksen vaikutuksesta mittauslukiin sekä kuinka kauan kestää kärjen lämpötilan tasaantumisen kenttäolosuhteissa. Tasaantumiseen vaikuttaa mm. alkureiässä käytetyn veden lämpötila. Lämpötilatasaukseen käytettäväksi ajaksi alkukairausreiässä suositellaan jopa puolta tuntiakin. Yleensä suurimmat gradientit esiintyvät kuitenkin jo 2–3 minuutin jälkeen. Kairan karkiosan lämpötila on yleensä ehtinyt tasaantua 10–15 minuutin jälkeen. CPTU-kärjille on myös myynnissä oheistarvikkeena kuvan 11 kaltaisia lämpötilasäädettäviä kuljetuslaatikoita.



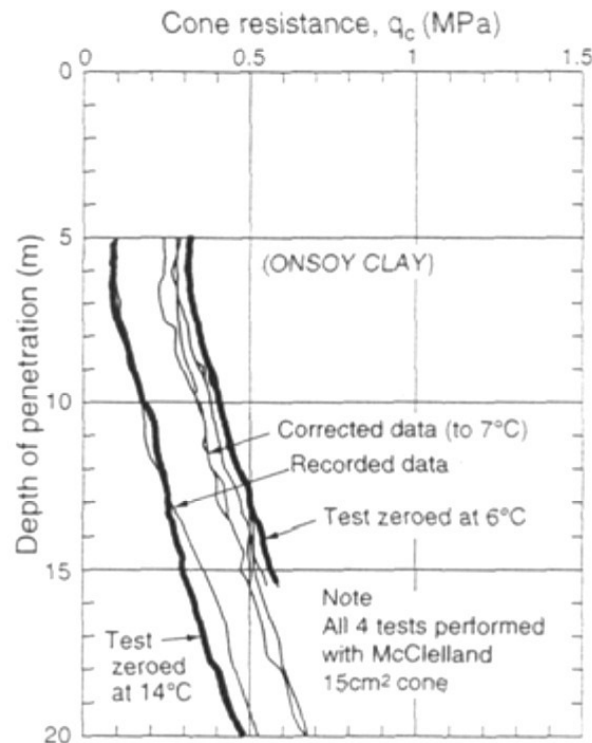
Kuva 11. Kärjen lämpötilatasaukseen lämpötilasäädettävä kuljetuslaatikko

Alun nollalukemat vähennetään mitatuista arvoista ts. alussa mitatut nollalukemat vastaavat mittauksen nollatasoa. Muutos tähän nollatasoon vastaa kuormitusta. Lopussa mitatuilla nollalukemilla voidaan tarkastella onko nollalukemiin tapahtunut muutoksia ja tarvittaessa suunnittelija voi käyttää tuloksin myös jälkimmäisiä nollalukemia, jos epäilee alun nollalukemien olevan virheellisiä esim. lämpötilasta johtuen. Tällöin alun nollalukemat on mitattu ennen lämpötilan tasaamista maan lämpötilaan. Huokosvedenpaineessa nollalukemat poikkeavat tyypillisesti lopussa alun nollalukemista hienojakoisessa maassa, sillä suotimeen tunkeutunut hienoaaines estää muodostuneen paineen nopean tasaantumisen. /2/

Lämpötilan muutos mittauksen aikana voi tehdä vaippavastuksen mittaustuloksista hyvin epäluotettavia. Hyvällä lämpötilantasaauksella voidaan rajoittaa virheen suuruus 0,05 % mittausasteikon suuruudesta. Myös, jos kärjessä on lämpötila-anturi ja tiedetään kuinka paljon lämpötila vaikuttaa mittaustulokseen, voidaan mittausdataa jälkikäteen korjata. /2/

Kuvassa 12 on esitetty, miten vaikuttaa väärässä lämpötilassa otettu alkunollalukema mittaustuloksiin. Tutkimuksessa on käytetty poikkeuksellisesti 15 cm² kärkeä. Alkunollalukemien jälkeen lämpötila on joko noussut yhden asteen tai laskenut 7 astetta. Yhden asteen nousu vaikuttaa lisäävästi sähkönjohtavuuteen karkivastuksen voima-antureissa, jolloin se näkyy suurempana vastuksena tuloksissa. Seitsemän asteen lasku nollamittauksen jälkeen näkyy taas päinvastoin pienempinä karkivastuksen arvoina. Lämpötilamuutoksen vaikutus kärkeen on rakenteesta ja kärjen materiaalista

riippuvaista, joten kuvan tutkimustuloksia kannattaa pitää vain viitteellisinä tuloksina. Tutkimus on tehty 1980-luvun puolivälissä, jolloin CPT-kairauskokeet vasta kunolla alkoivat yleistyä.



Kuva 12. Väärässä lämpötilassa otettujen nollalukemien vaikutus mittaustuloksiin /4/

Eurostandardin vaatimusten mukaisesti kärjen lämpötila vaikutus pitää määrittää upottamalla kärki esim. eri lämpöisiin vesisäiliöihin. Mittauksien avulla saadaan määritettyä kärjen nollalukemien muutos celsius astetta kohti ja sekä määrittää kenttäolosuhteita varten lämpötilatasaukseen tarvittava aika.

Käytännön kokemuksen perusteella on todettu, että 5 tonnin (50 MPa) kärjillä saavutettava lämpötilan vakaus on:

- 2,0 kPa / °C Kärkivastukselle
- 0,1 kPa / °C Vaippavastukselle
- 0,05–0,1 kPa / °C Huokospaineelle (riippuu huokospaineen kuormitusvälistä 1-2 MPa)

Tämän kaltaisia arvoja suositellaan ruotsalaisessa CPTU-ohjeistuksessa. Suuremman kapasiteetin omaavien kärkien vastaavat arvot saavat suureta suhteessa kapasiteetin kasvuun. /20/

1.6.5 Kaltevuus

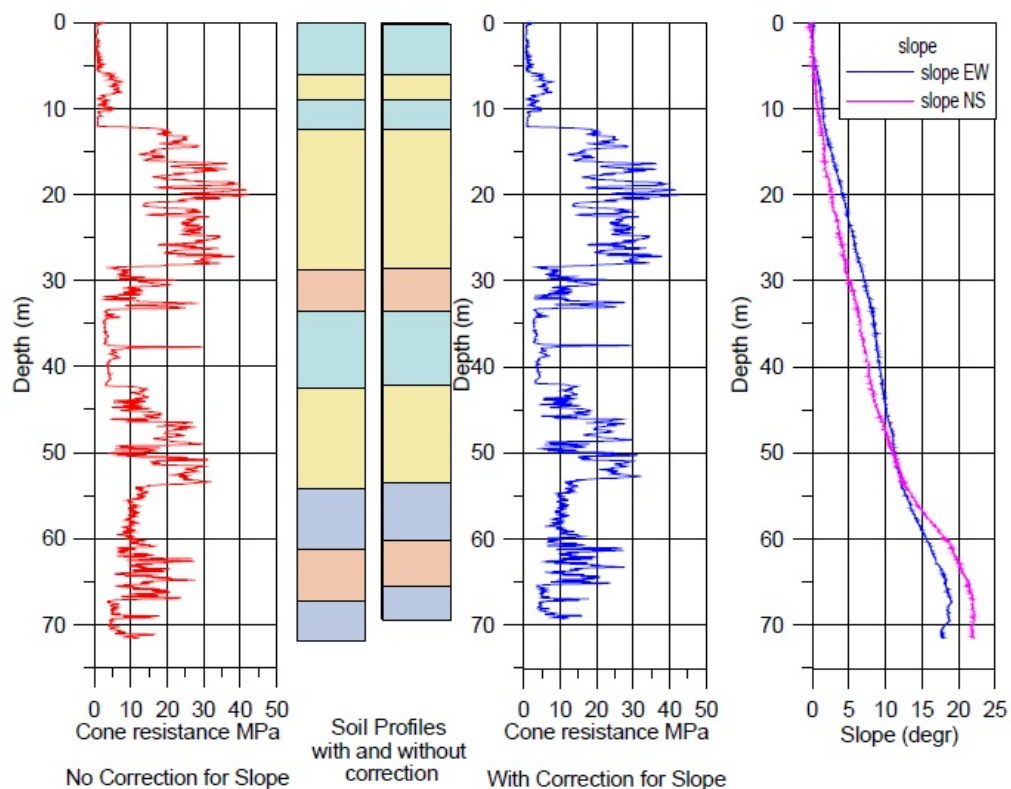
Useimmat tämän päivän kärjet sisältävät yksinkertaisen kaltevuuden mittausturin, jonka avulla voidaan tarkastella kairauksen suoruutta. Varsinkin hyvin syvissä kairauksissa on vaarana kärjen suuntautuminen vinoon, joka aiheuttaa vääristymiä vastusten mittauksissa, mutta myös kairauksen todellisessa syvyydessä. /2/ Eurostandardin mukaan kaltevuuden mittausta ei tarvita, jos kairauksen tunkeutumissyvyyden tavoii-

tearvo on alle 5 m ja käyttöluokka 4. Muissa tapauksissa kaltevuuden mittausta vaaditaan. /9/

Kairauksien kaartumista aiheuttaa myös tankojen epäsuoruus. Tankojen suoruus on helppo tarkistaa tasaisella alustalla pyöräyttämällä tankoa. Kairavaunun puomin suoruus pitää tarkistaa ennen kairausa sekä suoruus kannattaa vielä tarkistaa juuri ennen kairauksen aloitusta, ettei muutoksia ole tapahtunut. /2/

Kokemusten perusteella on todettu, että kun kairaus lähtee kaartumaan, kaartuminen jatkuu kairauksen edetessä lähes samansuuruisena homogeenisessä maassa suurentaen kaltevuutta. Standardilaitteisto kestää noin 1 asteen kaartuman metrillä ilman vahinkoja. Äkillinen kaartuma, jolloin kaartuma ylittää 5 astetta per metri tai jo aiemmin, voi aiheuttaa vahinkoa kärjelle ja tangoille. Tällöin kairaus on lopetettava. Kaltevuus saa olla korkeintaan 15 astetta koko kairauksen mitalla. Tämän ylityttyä pitää keskeyttää kairaus, vaihtaa paikkaa ja yrittää uudelleen. /2/ Mikäli mittauslaitteiston kaltevuuden mittausalue ylitetään jo aiemmin, pitää kairaus myös lopettaa.

Kuvassa 13 on esimerkkinä kallistumisen vaikutus syvässä kairauksessa. Eurostandardin mukaisesti tunkeutumissyvyys tulisi korjata kaltevuusmittauksien perusteella vastaamaan todellista syvyyttä /9/.



Kuva 13. Esimerkki syvyyskorjaamattomasta ja korjatusta profilista syvässä kairauksessa /5/

Kairauskoetta tehdessä voidaan tankoja lisätä kahden metrin pätkissä. Kaltevuusvirheen pienentämiseksi painaminen olisi hyvä tehdä metri kerrallaan varsinkin kairauksen alkuvaiheessa, toisin sanoen painetaan tankoja alas ensin metri mahdollisimman alhaalta, minkä jälkeen ote korjataan ja painetaan vielä toinen metri tankoja alaspäin. Tällöin vältetään tankojen kaartuminen maanpinnalla, mikä voi varsinkin kairauksen yläpäässä vaikuttaa kärjen suuntautumiseen merkittävästi karkeissa maalajeissa.

1.6.6 Negatiivinen vaippavastus mittauksessa

Toisinaan hyvin pehmeissä hienojakoisissa maissa voi esiintyä vaippavastuksessa negatiivisia arvoja. Koska on fysikaalisesti mahdotonta, että vaippavastuksen mittaaminen olisi negatiivista, niin tämän on johdettava epätarkkuuksista ja virheistä, joiden syynä voi olla yksi tai useampi alla olevista kohdista /2/:

1. Alkunollalukemien lukemisen jälkeinen nollatason siirtyminen negatiiviseksi
2. Epätasainen rasitus vaippahylsyssä
3. Vaippakitkan korjaaminen väärällä korjauskertoimella (pinta-alakertoimella) tai vaippahylsyn yläpäähän vaikuttaa hyvin korkea huokosvedenpaine verrattuna alapäähän
4. Huono mittaustarkkuus hyvin pienillä vastuksilla (vastusten ollessa alle 0,05 % täydestä asteikosta)

Nollatason muutos negatiiviseksi lämpötilan muuttuessa kärjessä, aiheuttaa useimmiten negatiivisia arvoja mittauksissa. Lämpötilan muuttumisesta johtuva virhe on hallitseva vain hyvin pienillä vastuksilla sekä tästä johtuvaa virhettä voidaan hyvin välttää, kuten kappaleessa lämpötilavaikutukset on käsitelty. /2/

Epätasaisen rasituksen kohdistuminen vaippahylsyyn voi aiheuttaa negatiivisia lukemia. Tätä voidaan kuitenkin ehkäistä lisäämällä venymäliuskojen määrää kahdesta kahdeksaan ja asentamalla ne kärjen ympärille symmetrisesti. Tällöin venymäliuskojen mittaukset kompensoivat paremmin toisiaan. /2/

Huokosylipaineen epätasaista vaikutusta vaippahylsyyn voidaan vähentää vaippahylsyn ylä- ja alapään pinta-alojen suunnittelulla samankokoisiksi. Tällöin myös tulosten tulkitsija pystyy helpommin arvioimaan huokosylipaineen vaikutusta ala- ja yläpäähän huokosvedenpainemittauksen perusteella. /2/

Hyvin pienten kuormitusten mittaaminen tarkasti on aina ollut ongelma. Hyvin pienet vastukset voivat näkyä joko negatiivisina tai positiivisina lukemina. Negatiiviset arvot näkyvät melko suurina negatiivisina kitkasuhteen arvoina, mitkä on helppo erottaa, mutta positiiviset virheelliset lukemat voivat jäädä huomaamatta. /2/

Kun negatiivisia vaippavastuksen arvoja havaitaan mittauksessa, on tärkeää selvittää sen syyt ja pyrkiä korjaamaan ongelmat. Negatiivisia arvoja harvoin havaitaan hiekkamaiden mittauksissa, mutta savimaissa, joissa kärkivastus on pieni ja huokosvedenpaine iso, tätä ongelmaa voidaan havaita. Mittaustiedosta, missä negatiivisia arvoja havaitaan mittauksessa, tulisi muokata ja korjata ongelman syyn ratkettua. Jos nollalukemien poikkeamisen perusteella nähdään siirtymistä tapahtuneen, voidaan mittaustieto korjata tällä nollalukemien erotuksella koko matkalta. /2/

Pitää muistaa, että vaikka hyvin pienen negatiivisen ja hyvin pienen positiivisen arvon välillä on vain pieni ero, niin vaikutus tulkittuihin tuloksiin on iso. Negatiivinen arvo ei ole kuitenkaan itsellään ongelma, vaan ongelmana on hyvin pienten arvojen oikein mittaaminen, sillä virhe, joka tekee lukemista negatiivisen, on usein arvoltaan pienempi kuin mittauksen tarkkuus. Nykyisillä kärkien rakenteilla ja testimenetelmillä voidaan lähes eliminoida ilmeiset negatiiviset vaippavastukset arvot. /2/

1.6.7 Kalibrointi

Kaksi merkittävintä virhettä liittyvät voima-antureihin sekä voima-anturin mittaus-tuloksen muuttamiseksi paineeksi kalibrointikertoimen avulla. /2/ Nämä virheet ovat:

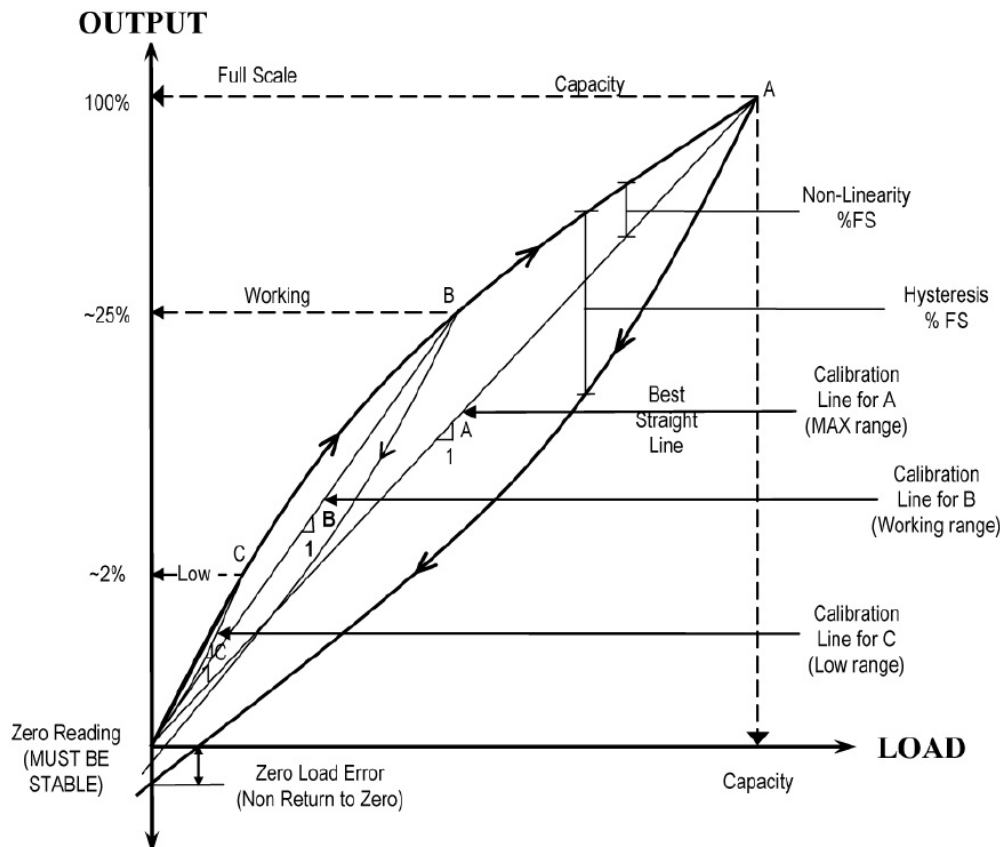
- Kalibroinnin virhe
- Nollakuormituksen virhe

Näitä kahta termiä on havainnollistettu kuvassa 14, missä on esitetty kalibrointisellin kuormitus-palautus sykli. /2/

Tutkimukset ovat osoittaneet, että maa-aineksen tunkeutumisella liitoksista kärkeen voi olla suuri merkitys kalibrointivirheeseen. Kalibrointivirheeksi käsitetään myös se kuormituksen osa, joka ei kohdistu voima-anturiin. Tämä voi johtua tunkeutuneesta maa-aineksesta, joka voi johtaa kuormituksen kärjen muuhun rakenteeseen, kuin mi-hin voima-anturi on kiinnitetty. Kuitenkin, tätä ongelmaa voidaan ehkäistä säännöllisellä liitoksien tarkkailulla ja puhdistuksilla. Myös kalibroinnista kulunut aika on pidettävä mahdollisimman lyhyenä. Kalibroinnin paikkansa pitävyyttä tulisi testata maastossakin yksinkertaisilla kuormituksilla. Kalibrointikertoimen määrittämisessä pitäisi myös huomioida toistettavuus, epälineaarisuus ja hystereesi parhaan kalibroin-tisuoran määrittämiseksi. /2/

Hystereesin vähentämiseksi kalibroinnissa, pitää varsinkin uutta kärkeä kuormittaa vähintään 20 kertaa maksimi kapasiteettiinsa ennen kalibroinnin varsinaista kalib-rointikuormitusta. /2/ Hystereesi kuvastaa mittauksen reagointia muutoksiin sekä laitteiston palautumiskykyä alkuperäiseen tilaan kuormituksen vähentyessä.

Kalibrointikäyrän epälineaarisuudesta johtuvaa poikkeamaa voidaan vähentää huo-mattavasti rajaamalla kärjen käyttöalue tavalliselle työskentelyalueelle. Esimerkiksi, jos kärkivastuksen tyypillinen maksimi kuormitus on 40 MPa (400 bar), mutta pääosin vastukset pyörivät 0–20 MPa:n välillä (0–20 bar), niin tällöin voitaisiin käyttää kalib-rointikerrointa, joka on määritetty välille 0–20 MPa (kuvassa piste B), vaikka kärjen kapasiteetti olisikin 1 00 MPa (1 000 bar). /2/



Kuva 14. Tyypillinen voima-anturi kuormitus kuvaaja – Anturin kalibrointi käyrä liioitetulla epälineaarisuudella termien selventämiseksi /2/

Koestus hyvin pehmeissä normaalikonsolidoituneissa maissa, jossa maksimi kärkivastus on luokkaa 0,5 MPa tai vähemmän, riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi kalibrointialueeksi voi muodostua 0–0,2 MPa (piste C, kuva 14). /2/

Joissain tapauksissa, voi olla mahdollista käyttää eri kalibrointisuoria eri kuormitusalueille (vrt. kalibrointi suoria C ja B, kuvassa 14). Kalibrointikerroin valitaan kairauksen mitattujen vastusten mukaan. Kuormitusalueen jakaminen kahteen tai kolmeen osaan vähentää huomattavasti epälineaarisuutta varsinkin pienillä vastuksilla. /2/

Kalibrointikertoimen määrittäminen tulisi tehdä lähellä maan lämpötilaa. Tällöin kalibroinnissa venymäliuskan sähkönjohtavuuden tarkastelualue vastaa mahdollisimman hyvin in situ -tilannetta. Kappaleissa nollalukemat ja lämpötilavaikutukset on käsitelty lisää nollalukemien ja lämpötilan riippuvuutta. /2/

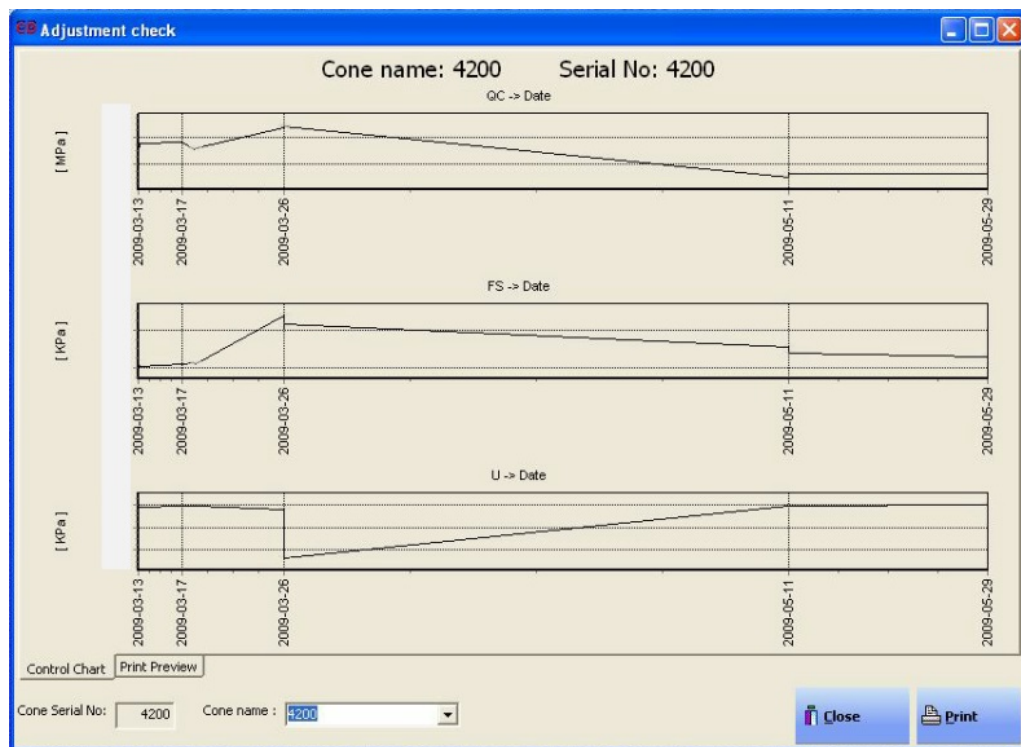
Valitettavasti vain muutamissa tutkimuksissa on käsitelty eri valmistajien kärkien tarkkuutta. Yleisesti, venymäliuskoihin perustuvat voima-anturit ovat tarjonneet parempaa tarkkuutta kuin pietsosähköiseen ilmiöön perustuvat anturit tai paineanturit. Huolellisella kärjen suunnittelulla, käytöllä ja huollolla, kalibroinnin virhe voidaan minimoida venymäliuskoihin perustuvalla voima-anturilla alle 0,4 % täydestä mitta-asteikosta. NGI (Norwegian Geotechnical Institute) osoitti tutkimuksessaan 1980-luvun puolivälissä, että suurikapasiteettisella kärjellä voidaan saavuttaa yhtä hyvä toistettavuus kairauksissa sekä mittaustarkkuus verrattuna herkkään kärkeen, jos kärki on tehty laadukkaista komponenteista, kalibroitu sopivalle mittausvälille sekä lämpötilan tasaantuminen on tehty huolella. Tutkimus osoitti myös, että vaippavastuksen mittaus on epäluotettavin eri kärkirakenteilla, mikä johtuu mahdollisesti vaip-

pakitkan korjauksesta tietämättä mikä paine oikeasti vaikuttaa hylsyn ala- ja yläpäässä. /2/ On huomioitava, että tutkimus on tehty noin 30 vuotta sitten. Kärkien tarkkuus varsinkin herkän kärjen osalta on parantunut kehityksen myötä.

Kitkahylsyn halkaisijan on oltava yhtä suuri kuin kärkikartion halkaisija. Kitkahylsyn halkaisijalle sallittu toleranssiväli kärkikartion suhteen on $0...+0,35$ mm. /9/ Tämä suurempi sallittu kitkahylsyn halkaisija sekä käytöstä johtuva kärjen kulumisen johtavat huomattavaan eroon halkaisijoiden välillä. Tästä halkaisijoiden koko erosta johtuen on todettu aiheutuvan huomattavaa vääristymää mitatuissa vastuksissa. /2/

Halkaisijoiden eroa voidaan vähentää huolellisella kärkikartion ja vaippahylsyn työstämisellä tekovaiheessa sekä säännöllisillä kulumisen tarkastuksilla, ettei halkaisijoiden ero ylitä sallittua $0,35$ mm. /2/

Kalibrointi tulisi tehdä säännöllisesti vähintään puolen vuoden välein. Jos tallenteista käy ilmi, että tietoihin ei ole kirjautunut merkittäviä poikkeamia, kalibrointien väli voi olla pidempi. Tällaisia poikkeamia voi seurata alkunollalukemien avulla. Alkunollalukemien poikkeama saadaan laskettua, kun alkunollalukemat on tallennettu aina edellisen kalibrointikerrasta lähtien. Alkunollalukemien poikkeamassa näkyy kärkiosan käyttöiän aikaiset vaihtelut, joita pienet muutokset kärkiosan toiminnassa ja mitoissa aiheuttavat. /9/ Alkunollalukemien poikkeuma voi myös johtua kärjen puutteellisesta puhdistuksesta. Mikäli alkunollalukemat alkavat poiketa merkittävästi, niin viimeistään tällöin on suoritetta kärjelle perusteellinen puhdistus ja mahdollisesti O-renkaiden vaihto. Kuvassa 15 on esimerkki alkunollalukemien seurannasta ajan suhteen.



Kuva 15. Alkunollalukemien seuranta /6/

Muut tekijät, mitkä vaikuttavat mittauksen tarkkuuteen liittyvät kalibrointitapaan, datan keräykseen ja käsittelyyn.

1.6.8 Kalibrointi alueen ja portaiden valinta

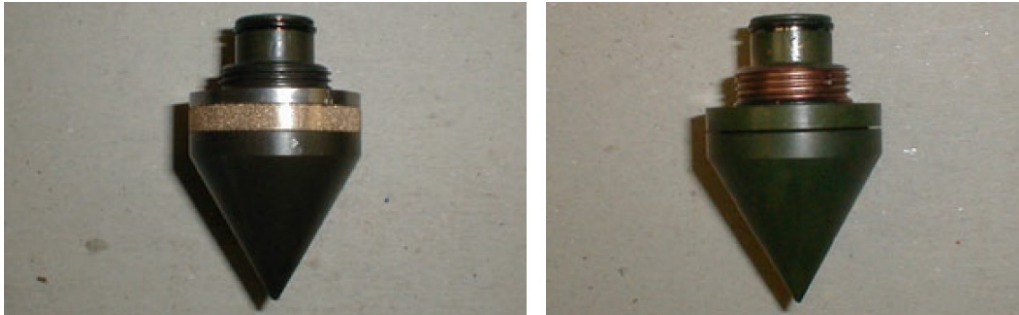
Kalibroinnissa käytettävät kuormitusportaat ja kärjen kuormituksen maksimiarvot vaihtelevat kärjen rakenteen ja käyttötarpeen mukaan. Kuormitusportaiden ja kuormituksen maksimiarvojen on katettava kuormitusalue, mistä ollaan kiinnostuneita. Kalibrointialue voidaan rajata pienemmäksi, kuin kärjen maksimi kuormitusalue on. /11/ Mitä suurempi käyttöalue valitaan kuormitusalueeksi, sitä suurempi kalibrointivirhe todennäköisesti on. Kalibrointivirhe on mittauslaitteiston ilmoittaman arvon ja todellisen arvon erotus jaettuna todellisella arvolla. Valittaessa tiheämpi jako alkupään kuormitusportaille saattaa se aiheuttaa suuremman kalibrointivirheen kuormitusalueen loppu päässä, sillä kalibrointisuoran sovituksen vaikuttaa enemmän pienen kuormituksen mittausarvot /11/.

Kärkivastuksen kalibroinnissa ASTM standardin D5778-12 mukaan kärkeä kuormitetaan vähintään kuudella kuormitusportalla, mitkä ovat suuruudeltaan 0, 2, 5, 10, 25, 50 ja 75 % kärjen täydestä mittausasteikosta. /11/ Eurostandardissa sanotaan, että yleisesti olisi noudatettava standardin ISO 10012 vaatimuksia, joka on kuitenkin vain yleisohje eikä ota tarkemmin kantaa CPTU:hun kuten ASTM:n standardi. ISO 10012:ssa mittausvaatimusten täytyminen määritellään asiakkaan tarpeiden mukaan, toisin sanoen CPTU-kärkeä ostaessa/kalibroitaessa tulisi osata määrittää tietty alue, millä halutaan tarkimmat mittauksen arvot.

Koska kalibrointi tehdään vain tietyillä kuormitusportilla, tällöin ei oteta huomioon kuormitusalueen alkupään käyttäytymistä. Varsinkin mittausasteikon alkupäässä on havaittavissa suurta eroa eri kuormitusalueelle suunnitelluissa kärjissä. 2 % kuormitusporras vastaa kärkivastuksen 0–100 MPa:n mittausalueella 2 MPa, mikä on arvoltaan huomattavasti suurempi kuin pehmeissä maissa mitatut kärkivastukset. Kalibrointi todentaa paremminkin mittauksen lineaarisuuden alimmasta kuormitusportasta suurimpaan kuormitusportaseen.

1.6.9 Kyllästämiseen käytettyjä nesteitä/rasvoja

Kyllästämisessä käytettävien nesteiden tai rasvojen täytyy olla kokoonpuristumattomia ja ilmattomia, jotta huokosvedenpaineen vaihtelu välittyisi paineanturille mahdollisimman hyvin. Yleisesti kyllästämiseen käytetään vakuuikäsitteltyä glyseriiniä tai keitettyä vettä huokossuotimellisessa kärjessä. Rakosuodatinmalleissa käytetään valkovaseliinia kärkiosan kyllästämiseen ja paineanturikammion kyllästämiseen samoja nesteitä, kun huokossuotimellisessä mallissa /3/. Myös silikoniöljy on huokossuodattimellisiin kärkiin sopiva kyllästysneste. Veden pienen viskositeetin takia kyllästys voidaan helpommin menettää verrattuna glyseriiniin tai silikoniöljyyn. Kyllästysaineen pysyminen kärjessä voidaan varmistaa laittamalla kumisukka kärjen ympärille. Kumisukka voi hieman vaikuttaa alunollalukemiin, mutta kun sen asettaa paikalle varovasti, kumisukan vaikutus lukemiin jää merkityksettömäksi. Hyvin pehmeässä savessa voi olla ongelmana, ettei kumisukka rikkoonnu kärjen työntyessä maahan. Ylimääräinen glyseriini ja silikoniöljy pitää ennen kairauksen aloitusta pyyhkiä pois kärjen pinnalta esim. asetonilla /3/. Kuvassa 16 on vasemmalla huokossuotimellinen kärkiosa sekä oikealla rakosuotimellinen kärkiosa.



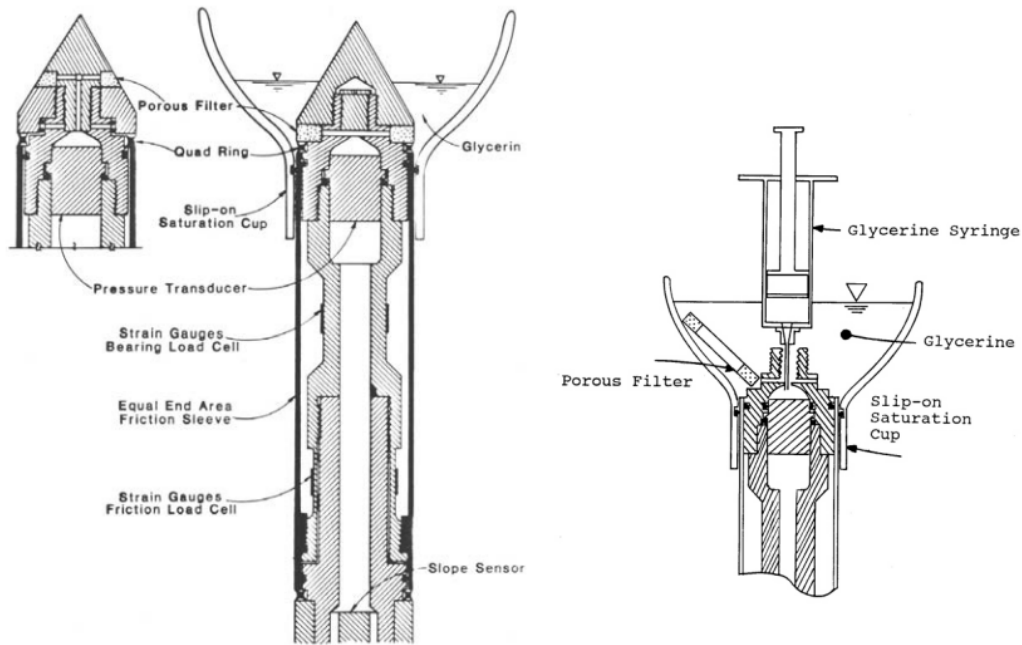
Kuva 16. Vasemmalla huokossuotimellinen kärkiosa ja oikealla rakosuotimellinen kärkiosa /17/

1.6.10 Kärjen epäonnistunut kyllästäminen

Epäonnistunut kyllästäminen näkyy mittaustuloksissa huonona reagoitina huokosylipaineen vaihteluun sekä huokosylipaineen arvot jäävät varsinkin aluksi pienimmiksi tai jopa olemattomiksi verrattuna todellisiin arvoihin. Onnistunut huokosvedenpaineen mittausta edellyttää suodattimen sekä suodattimen ja paineanturin välisen kanavan sekä kammion onnistunutta kyllästämistä. Kyllästymisen helpottamiseksi varsinkin huokossuotimelliselle kärjelle on kehitetty apuvälineitä, kuten alipainepumppu kyllästämiseen, kuten kuvassa 17. Esikyllästettyjä suotimiakin on myynnissä, mutta tällöin kärjen kokoaminen tulisi tehdä nesteessä jotta suotimen ja paineanturin väliseen kammioon ei jää ilmaa, kuten kuvassa 18. Rakosuotimellisen kärkiosan kyllästämiseen käytettävä rasva tulisi puristaa yhtenäisellä puristuksella. Pienestä purkista puristaminen yhtäjaksoisesti voi olla hankalaa, joten silikonipuristimen kaltaisella apuvälineellä voidaan helpottaa tätä vaihetta (Kuva 19). Rasva saisi pureskella reilusti yli raoista.



Kuva 17. Huokossuotimellisen kärjen kyllästäminen alipaineen avulla

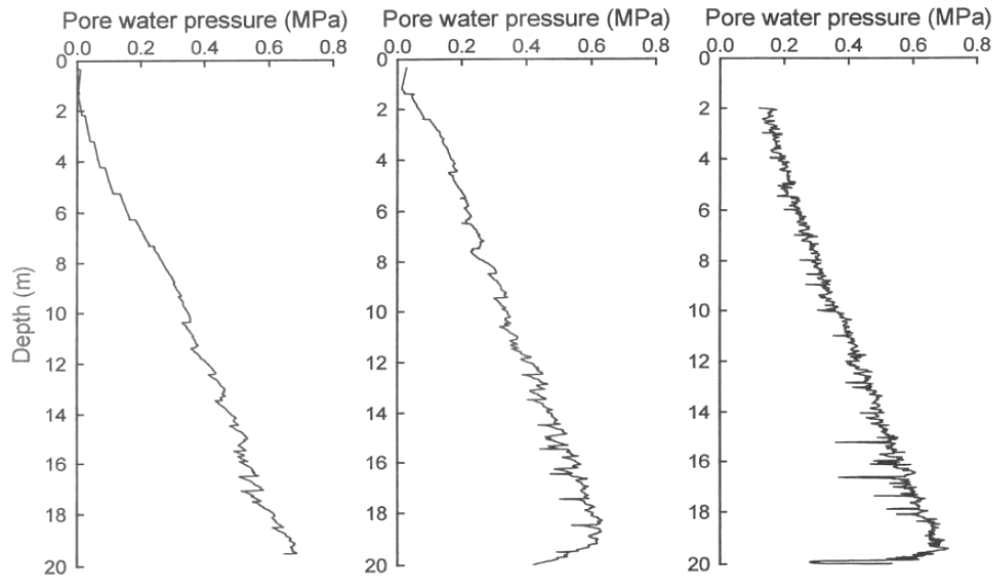


Kuva 18. Kärjen kokoaminen nesteeseen upotettuna /2/



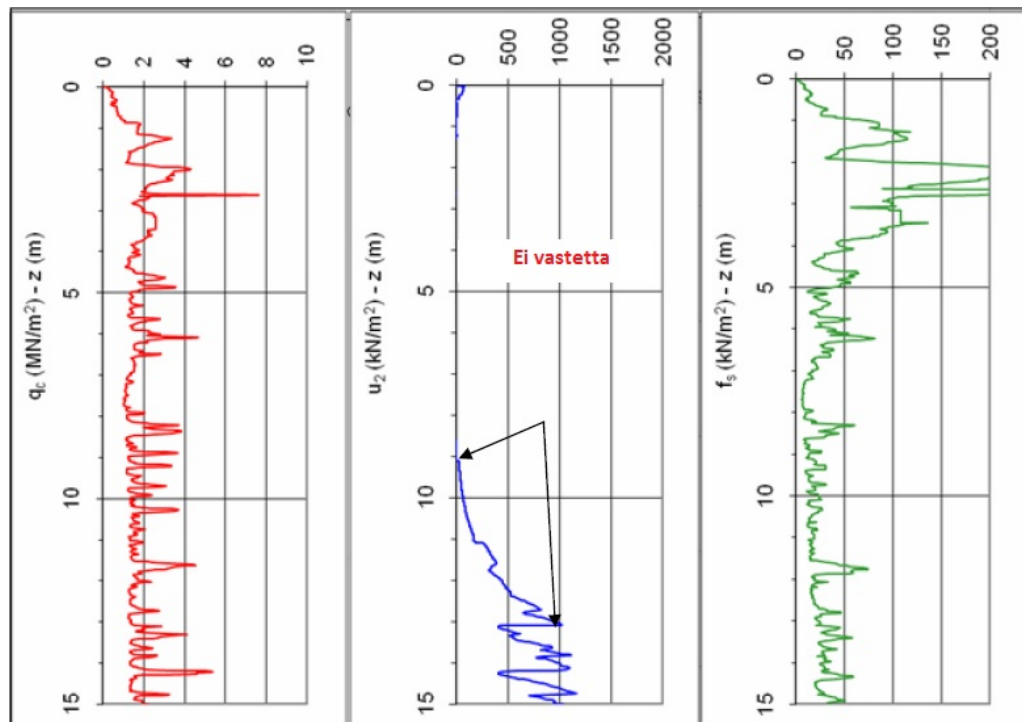
Kuva 19. Rakosuotimellisen kärkiosan kyllästys rasvalla /6/

Kuvassa 20 on esimerkki huokosvedenpaineen mittauksesta, jossa esiintyy huono huokosvedenpaineen reagoitua. Kyllästysaineeseen jäävät kuplat puristuvat ensin kasaan ennen kuin huokosvedenpaine välittyy täysin paineanturille asti. Kuplien puristuminen kasaan vaatii tietyn painetasen, minkä ylityttyä saadaan jotain mittaus-tuloksia. Nämä tulokset ovat kuitenkin olla jonkin verran alakanttiin todellisista arvoista.



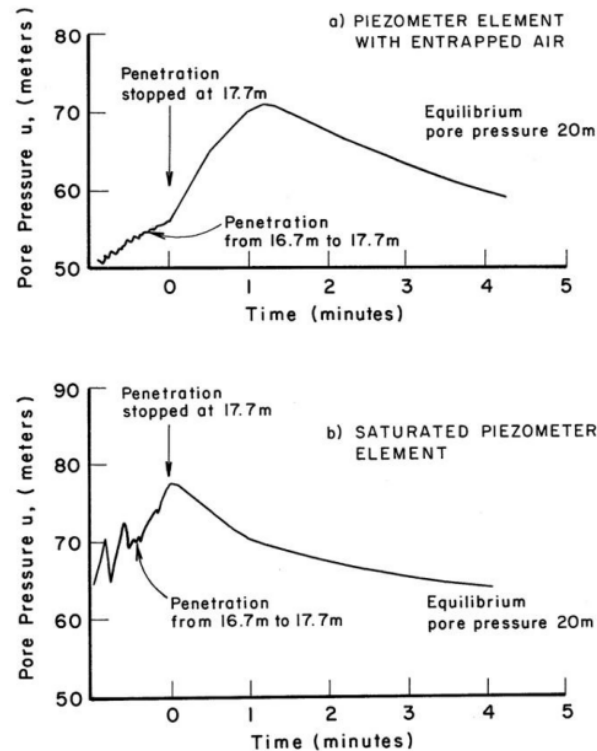
Kuva 20. Kyllästämisen onnistuminen: vasemmalla huono, keskellä keskin-
kertainen, oikealla hyvä /6/

Kuvassa 21 on esimerkkinä vielä huonommin onnistuneen kyllästämisen näkyminen kuvaajassa (tai kyllästämisen menetys heti alkusyvyyksillä).



Kuva 21. Aluksi ei vastetta huokospaineessa ns. banaaniprofiili /6/

Kuvassa 22 on kuvan 20 vasemman puoleisen diagrammin kaltainen huokosveden-
paineen käyttäytyminen kairauskokeen pysähtyessä. Kairauskokeen pysähtyessä sy-
vyystasolle 17,7 m huokospaine suurenee pysähtymisen jälkeen huonosti kyllästetys-
sä kärjessä, kun taas täysin kyllästetyn kärjen huokospainemittauksen arvot laskevat.
Kärjen painamisen pysähtyttyä huokosvedenpaineen pitäisi lähes välittömästi alkaa
tasaantumaan.

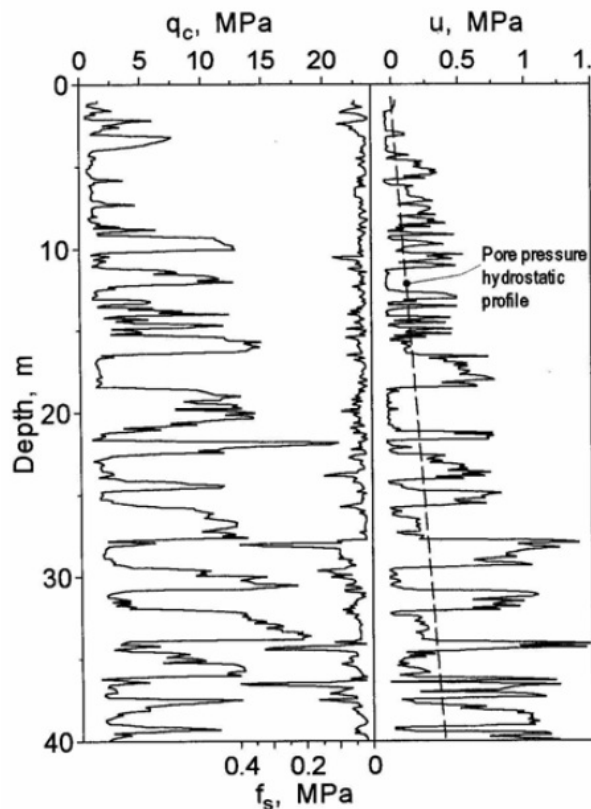


Kuva 22. Huokospaineen käyttäytyminen kairauksen pysähtyessä. Kuvassa yllä epäonnistunut kyllästäminen sekä alla onnistunut kyllästäminen /2/

1.6.11 Negatiivinen huokospaine

Negatiivisia huokosvedenpaineen arvoja esiintyy usein mittauksissa varsinkin tiivissä hiekassa ja siltissä. Tämä johtuu kärjen aiheuttamasta maan murtumisesta ja maan pyrkimisestä löytyä eli laajentua (dilatoitua). Tämä pyrkimys löytymiseen aiheuttaa negatiivisen huokospaineen, joka ei johdu siis virheellisestä mittauksesta. /5/ Negatiivinen huokospaine voi tosin aiheuttaa suotimen kyllästämisen menetyksen, joka taas aiheuttaa virheen huokospainemittaukseen. Tällaista kyllästämisen menettämistä voi myös tapahtua kuivakuoren läpäisyssä suoraan CPTU-kärjellä. Tämän takia yleensä tehdään alkukairausreikä kuivakuoren läpi, jotta vähennetään riskiä kyllästämisen menettämiseen. Myös kyllästämiseen käytetyn nesteen tai rasvan viskositeetti vaikuttaa, kuinka helposti neste pääsee ”karkaamaan” suotimesta.

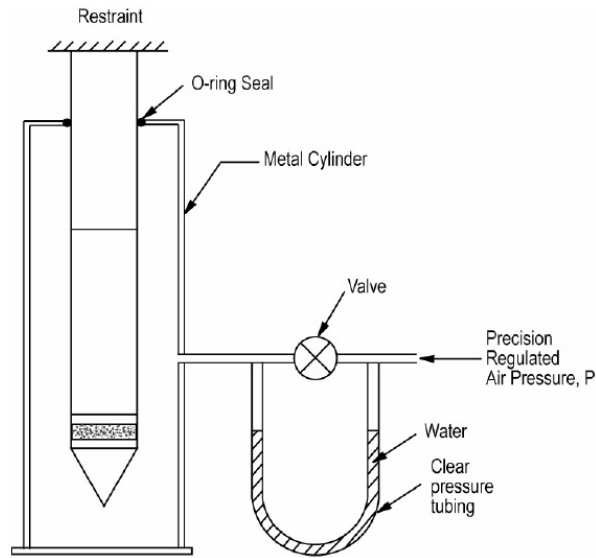
Kuvassa 23 on esitetty negatiivinen huokospaine ja sen näkyminen mittauksessa. Negatiivisen huokospaineen havaitsemista varten tarvitsee arvata tai tietää luonnollinen vedenpinnan taso, minkä avulla voidaan piirtää syvyyden mukaan kasvava vallitseva huokosvedenpaine profiili (kuvassa katkoviivalla piirretty suora).



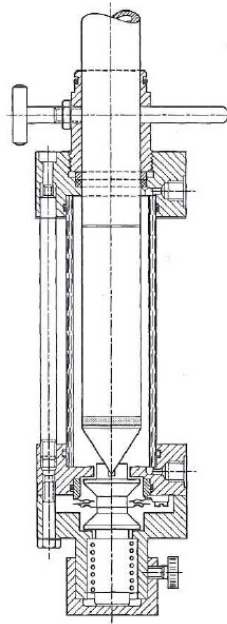
Kuva 23. Negatiivinen huokosvedenpaine /5/

1.6.12 Huokosvedenpainemittauksen kalibrointi

Huokosvedenpainemittauksen kalibrointi pitäisi tehdä kuvan 24 tai 25 kaltaisessa painesellissä. Kärkiosan on mahdollista selliin koottuna, niin että sellin sinetöinti on vaippahylsyn yläpuolella. Mittaamalla painesellissä kärkivastus sekä vaippavastus saadaan selville korjauskertoimet kärkivastuksen ja vaippavastuksen korjaamiseen. Kalibroinnin aikana tulisi olla muukin in situ -mittauksissa käytettävä mittaustilaiteisto kytkettynä kiinni kärkeen kalibroinnin ajan. Kuvan 24 venttiili on auki kalibroinnin aikana. Kalibrointiprosessi on sama kuin aiemmassa kappaleessa on kerrottuna. Kalibrointilaitteisto tarkastetaan kuormittamalla sellipaine kalibrointialueen maksimiinsa ja ylläpidetään maksimipainetta. Venttiili suljetaan, minkä jälkeen tarkkaillaan U-putken nestepintoja. Nestepintojen tasot pitäisi pysyä vakiona, mutta ellei näin ole, niin painesellissä on vuotoja. Painesellin vuotaessa on tarkistettava kärkiosan kiinnitys, O-renkaiden kunto sekä tarvittaessa rasvata renkaat silikonirasvalla. Laitteiston tarkistus on toistettava, niin monta kertaa, että vuodot on saatu tukittua. /2/

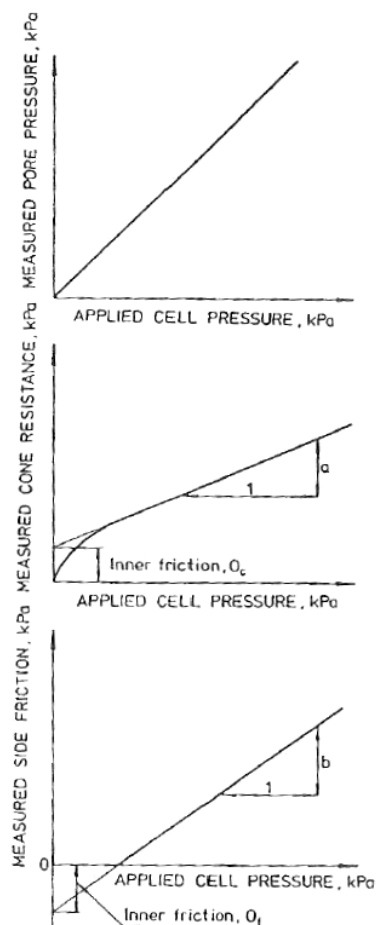


Kuva 24. Yksinkertainen huokosvedenpaineen kalibrointiselli /2/



Kuva 25. Kehittyneempi huokospaineselli kalibrointia varten. Mahdollisuus myös kärjen kuormitukseen

Vaippavastuksen ja kärkivastuksen korjauskertoimien määrittämisen lisäksi kalibrointikuvaajasta nähdään myös laitteiston sisäisen kitkan suuruus, kunhan kuormitus tehdään alussa riittävän pienillä kuormitusportailta (Kuva 26). Sisäisellä kitkalla voi olla suurikin merkitys kuormitusalueen alkupään arvoin /4/.



Kuva 26. Korjauskertoimien ja sisäisen kitkan määrittäminen /8/

1.6.13 Vaippavastuksen ja kärkivastuksen mittauksen syvyyskorjaus

Vaippahylsyn keskikohta on noin 8 cm kärkikartion kartio osan takana. Kairauksen tunkeutumissyvyys on kärkikartion kartio osan pohjasta mitattava etäisyys pystysuunnassa aloitustasoon (alkukairausreikä mukaan lukien). Laskettaessa kitkasuhdetta, voi olla tarpeen korjata kärkivastuksen ja vaippavastuksen arvot samalle syvyystasolle. Usein tämä syvyyskorjaus jätetään tekemättä, jolloin kitkasuhde vääristyy. Kitkasuhteen vääristymä voi suurentaa maan kerroksellisuuden kasvaessa. /2/ Eurostandardi ei edellytä tämän korjauksen tekemistä, joten riittää, että tämän mahdollisen virheen tiedostaa tulkitessa maalajikerroksia kitkasuhteen perusteella.

1.6.14 Kärjen huolto ja puhdistus

CPTU-kärjen huollolla ja puhdistuksilla voidaan minimoida voima-anturien ohi johtuvat voimat sekä vähentää mittaustaitteiston sisäistä kitkaa. Kairakärjen eri osien väliset o-rengas- ja rakotiivisteiden kunto tarkistetaan aina ennen kairauksen aloittamista. Tiivisteet puhdistetaan ja rakojen ja tiivisteiden väliin tunkeutunut maa-aines poistetaan (kuva 27). /3/ Puhdistustoimenpiteet kannattaa tehdä aina välittömästi kairauskokeen päätyttyä. Suodattimet tulisi vaihtaa jokaisen kairauksen jälkeen /9/.



Kuva 27. Kärjen huolto: puhdistus, tiivisteiden ja suotimen vaihto

1.6.15 Mittauslaitteiston virheet

Mittausvirhe voi myös johtua laitteiston komponenttien virheistä tai rikkoontumisista. Osittain tämän takia on hyvä testata välillä laitteistoa omilla kenttätesteillä, jotta ongelmat voidaan havaita. Testaamisen suorittaminen on laitteistosta riippuvaa, sillä mittaus tulosten näkyminen on riippuvaista mittausdatan tallentumisesta.

1.6.16 Mittauksen resoluution vaikutus tuloksiin

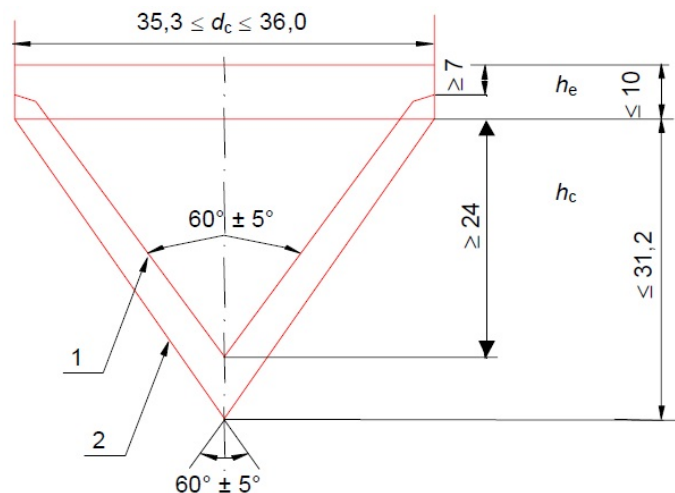
CPTU-kärjen venymäliuskojen sähkönjohtavuus muuttuu muodonmuutosten mukana. Tästä johtuva jännitesignaali on analoginen signaali ja täten myös jatkuvasti vaihteleva. Jatkuvasti vaihteleva signaali saa vaihtelualueellaan äärettömän määrän eri arvoja. Analogisen signaalin muuttaminen digitaaliseen muotoon vaatii jännitteen vaihtelualueen pilkkomista äärelliseen määrään arvoja, jotta arvot voidaan ilmoittaa bittien muodostamina lukujonoina. Jännitteen vaihtelualue määräytyy pääosin laitteiston kuormituskestävyyden ja kärjen rakenteen mukaan eli CPTU-kärjessä jännitteen vaihtelualue muodostuu esim. kärjen osalta sen maksimikuormitusalueella muodostuvista jännitteen arvoista. Kuormitusalueen ala- tai yläpuoliset arvot vastaavat alinta tai ylintä digitaalisen signaalin lukujonoa.

Mittauslaitteiston resoluutio määrittää, moneenko jännitetasoon maksimikuormitusalue on jaettu. Huono resoluutio voi aiheuttaa suurempaa lopullista mittausvirhettä. CPTU-kärjen, jonka kapasiteetti on esimerkiksi välillä 0–75 000 kPa (7,5 t) ja resoluutio 2^{12} , pienin havaittava jännityksen muutosarvo on 18,31 kPa. Resoluution suurenemisella esimerkiksi 2^{16} , pienin havaittu jännitysmuutos pienenee arvoon 1,15 kPa. Kuormitusalueen rajaaminen kalibroinnissa suppeammaksi ei paranna mittauslaitteiston erottelukykä, vaan ainoastaan pienentää kalibrointivirhettä. Samalla resoluutiolla toteutettu mittauslaitteisto, jonka maksimikuormitusalue on kuitenkin suppeampi, kykenee tarkempaan erottelukykä. Esimerkiksi herkän kärjen kuormitusvälillä 0–7 500 kPa (0,75 t) erottelukykä resoluutiolla 2^{12} on 1,83 kPa. /17/

1.6.17 Kärkikartion, suotimen ja vaippahylsyn mittatoleranssit

Kuvassa 28 on esitetty sallitut mittatoleranssit kärkikartiolle. Kärkikartion halkaisija sekä myös pinnan karheus vaikuttavat mitatun vastuksen suuruuteen. Karheampi pinta lisää osaltaan kärkivastuksen suuruutta, minkä takia pinnasta epätavallisen karhealta vaikuttavat kärkikartiot tulisi poistaa käytöstä. Myös epäsymmetrisesti kulunut kärkikappale, joka kuitenkin täyttää mittatoleranssit, tulisi vaihtaa uuteen. /9/

Pinnan karheuden vaikutusta mittaustuloksiin on hankalampi määrittää sillä karheutuminen riippuu täysin, missä maalajeissa kairaukset tehdään. Kärkiosan halkaisijan d_c osalta voidaan laskea halkaisijan muutoksen vaikutus pinta-alaan ja tätä kautta, myös kärkivastukseen. Kalibrointi tehdään vastaamaan halkaisijaltaan 35,7 mm (1000 mm²) kärkikartiota, jolloin mittatoleransseista johtuva virhe vaihtelee välillä -2,14...+1,79%. Jottei virhe kasva tätä suuremmaksi, kairausta aloittaessa on varmistuttava, että kärkikartio, vaippahylsy ja suodatin täyttävät mittatoleranssit.



Kuva 28. Kärkikartion toleranssivaatimukset 1.) Kartion minimi mitat kulumisen jälkeen 2.) Kartion maksimi mitat /9/

Vaippahylsyn halkaisija d_2 ilmoitetaan suhteessa kärkikartion halkaisijaan. Vaippahylsy ei saa olla missään tapauksessa halkaisijaltaan pienempi kuin kärkikartio. Vaippahylsyn sallitut mittatoleranssit halkaisijalle: $d_c \leq d_2 < (d_c + 0,35)$ mm ja $d_2 < 36,1$ mm sekä pituudelle $132,5 \text{ mm} < l_s \leq 135,0 \text{ mm}$. /9/

Suodatinosan mittatoleranssit, kun huokospainemittaus tapahtuu kärkikartion sylinterijatkon tai heti sen jälkeen: $d_2 - 0,2 \text{ mm} \leq d_{fil} \leq d_2$ ja $d_c \leq d_{fil} \leq (d_c + 0,2) \text{ mm}$. /9/

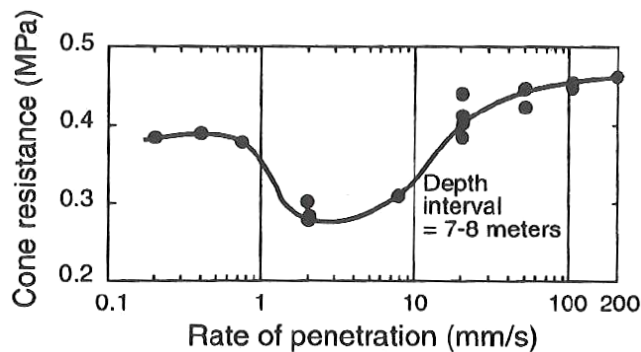
Mittatoleranssien ja karheuden testaamiseenkin on apuvälineitä, mitkä helpottavat vaatimusten tarkistusta, kuten kuvan 29 apuvälineet. Karheutta voidaan testata tunustelemalla eri karheuksisia pintoja, ja tämän perusteella arvioida onko kärjen tai vaipan karheus liian suuri. Mittatoleranssien täyttymistä voidaan testata mittalevyn avulla, mihin on merkitty osien sallitut mitat.



Kuva 29. Vasemmalla kärkikartion ja vaippahylsyn karheuden testauksen apuväline sekä oikealla mittatoleranssien tarkistamiseen käytettävä mitta-toleranssilevy /6/

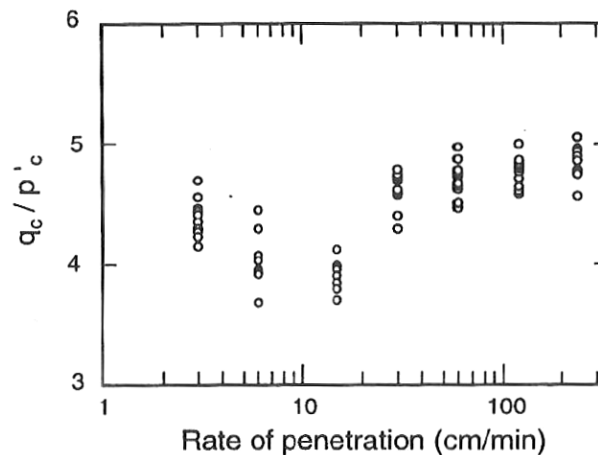
1.6.18 Puristusnopeuden vaikutus

CPTU-kairauskokeen puristusnopeus on 20 mm/s (sallittu poikkeama ± 5 mm/s). /9/ Puristusnopeuden vaikutusta on tutkittu monessa eri maalajissa ja monen eri tutkijan toimesta. Useimmiten tutkimukset ovat käsitelleet puristusnopeuden vaikutusta kärkivastukseen. Näistä tutkimuksista varsinkin Bembenin ja Myersin (1974) sekä Roy et al. (1982) tutkimus käsittää hyvin laajan otoksen eri puristusnopeuksia /14/. Bembenin ja Myersin tutkimuksessa kairaukset suoritettiin hieman ylikonsolidoituneessa kerroksellisessa savessa käyttämällä 9 eri nopeutta välillä 0,2–200 mm/s (Kuva 30). He päättelivät käyrän muodon selittyvän viskoosisuudella sekä huokosylipaineen taantumisella. Täten käyrässä on nähtävissä savelle tyypillinen avoimen ja suljetun tilan käyttäytyminen sekä näiden kahden tilan välinen puoliavoin tila. Suljetussa tilassa kuormitusnopeuden kasvaessa viskoosinen vastus suurenee ja kärkivastus näin ollen kasvaa. /4/



Kuva 30. Puristusnopeuden vaikutus kärkivastukseen Bembenin ja Myersin tutkimuksessa 7–8m syvyydeltä /4/

Royn et al. tutkimuksen tulokset vastaavat hyvin Bembenin ja Myersin tuloksia /15/. Kairaukset suoritettiin sensitiivisessä, pehmeässä lievästi ylikonsolidoituneessa silttissä savessa käyttämällä seitsemää eri kuormitusnopeutta välillä 0,5–40 mm/s (Kuva 31). Tulosten hajonta johtuu siitä, että testissä käytettiin erimuotoisia kärkiä. /4/



Kuva 31. Puristusnopeuden vaikutus kärkivastukseen Royn et al. tutkimuksessa /4/

Kuormitusnopeuden ja leikkauslujuuteen riippuvuuden löytäminen myös CPTU-kairauskokeelle on hyvin järkeenkäypää. Hyvin hitaalla puristusnopeudella avoimen tilan käyttäytyminen on vallitsevaa. Puristusnopeuden kasvaessa huokosylipaine pääsee kasvamaan ja tehokkaat jännitykset pienenevät. Tällöin myös kärkivastus pienenee. Puristusnopeuden edelleen kasvaessa viskoosiset voimat alkavat suuren, jolloin kärkivastuksen arvo alkaa taas kasvaa. /4/

Tutkimuksia, joissa myös huokosylipaineen mittauksia on käsitelty, on tehty huomattavasti vähemmän sekä käytettyjen kuormitusnopeuksien vaihteluväli on ollut paljon pienempi. Huokosylipaineen kehitymisessä on kuitenkin havaittu täysin avoimen, osittain avoimen ja suljetun tilan käyttäytymistä. Avoimessa tilassa ylipaine on pienintä ja suljetussa tilassa suurinta. Varsinkin välimaalajeissa, kuten siltissä, eri kuormitusnopeudella tehtävät kairaukset auttaisivat arvioimaan onko maan käyttäytymisen lähempänä koheesio- vai kitkamaalajia. /4/

1.6.19 Pysähdyksistä johtuvat epäjatkuvuudet

Pysähdykset kairauksen aikana, kuten tankojen lisääminen, aiheuttaa usein pieniä piikkiarvoja/epäjatkuvuuksia mittauksiin tai vettä kohtuullisesti johtavissa maissa mitatun huokospaineen alenemista. Tällaisia pysähdyksistä johtuvia piikkiarvoja voidaan suodattaa datasta pois, kun tiedetään niiden aiheutuneen kairauksen katkoksisista. Tällöin myös maalajiluokitus diagrammista tulee selkeämpi.

1.6.20 Maan kerroksellisuuden vaikutus

Laajenemisteoria ja jännityspolkuteoria sekä myös laboratoriokokeet ovat osoittaneet, että kärkivastukseen arvoon vaikuttaa kärjen ala- ja yläpuolinen materiaali. Näin ollen kärki alkaa aistia tulevan materiaalin ominaisuuksia jo ennen kuin on tunkeutunut siihen, mutta myös tunkeutumisen jälkeen uuteen materiaaliin, kärki aistii aiem-

man materiaalin ominaisuuksia. Tästä johtuen CPT ei aina mittaa oikeita mekaanisia ominaisuuksia ohuista kerroksista sisältävässä maassa. /4/

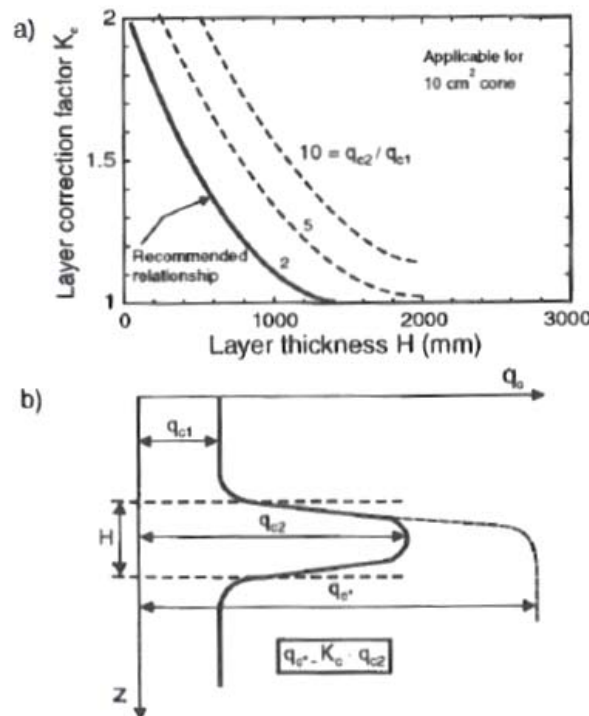
Etäisyys, milloin kärki alkaa aistia uuden materiaalin, riippuu uuden materiaalin jäykkyydestä. Pehmeissä materiaaleissa etäisyys kärjen aistimaan materiaaliin voi olla niin pieni kuin kahdesta kolmeen kärjen halkaisijan verran, kun taas jäykässä materiaalissa aistimista voi tapahtua jo etäisyydellä 10–20 kärjen halkaisijan verran. Tästä johtuen materiaali paksuuden pitää olla pehmeissä maissa 100 mm ja jäykissä maissa jopa 750 mm tai enemmän, jotta kärkivastuksen arvo vastaa materiaalin täyttä arvoa. CPT kyllä havaitsee tätäkin pienemmät kerrokset, mutta jäykässä kerroksessa se voi johtaa lujisuuden aliarvioimiseen. /4/

Perustuen yksinkertaistettuun elastisuuteen Vreugdenhil et al. (1994) esittivät tavan, kuinka korjata kärkivastuksen arvoja ohuissa kerroksissa /16/. Virhe mitatussa kärkivastuksen arvossa ohuessa jäykässä kerroksessa on kerroksen paksuuden ja sen jäykkyyden sekä myös ympäröivän maan jäykkyyden funktio. Kerrosten suhteellista jäykkyyttä vastaa kärkivastuksen arvo ympäröivässä pehmeässä kerroksessa (q_{c1}) ja ohuessa jäykässä kerroksessa (q_{c2}). Tähän oletukseen perustuen on johdettu korjatun kärkivastuksen kaava ohuessa jäykässä kerroksessa: /4/

$$q_{c^*} = K_c \cdot q_{c2}$$

K_c = Korjauskertoimen kärkivastukselle kerroksen paksuuden funktiona

Kuvassa 32 ylhäällä on nähtävissä kohtuullinen trendi korjauskertoimelle, mutta kärkivastusten suhteen osalta vaikutus on turhan suuri. Tämän takia on järkevämpää korjata vain varovasti kärkivastussuhdetta 2 vastaavan käyrän mukaisesti. Kuvassa 30 alhaalla on esitetty termien selitykset. /4/



Kuva 32. Suositeltava korjaus kärkivastuksen arvolle ohuessa hiekkakerroksessa /4/

Alla olevassa kaavassa on esitetty korjauskertoimen määritelmä kärkivastussuhteelle 2.

$$K_c = 0,5 \cdot (H/1000 - 1,45)^2 + 1,0$$

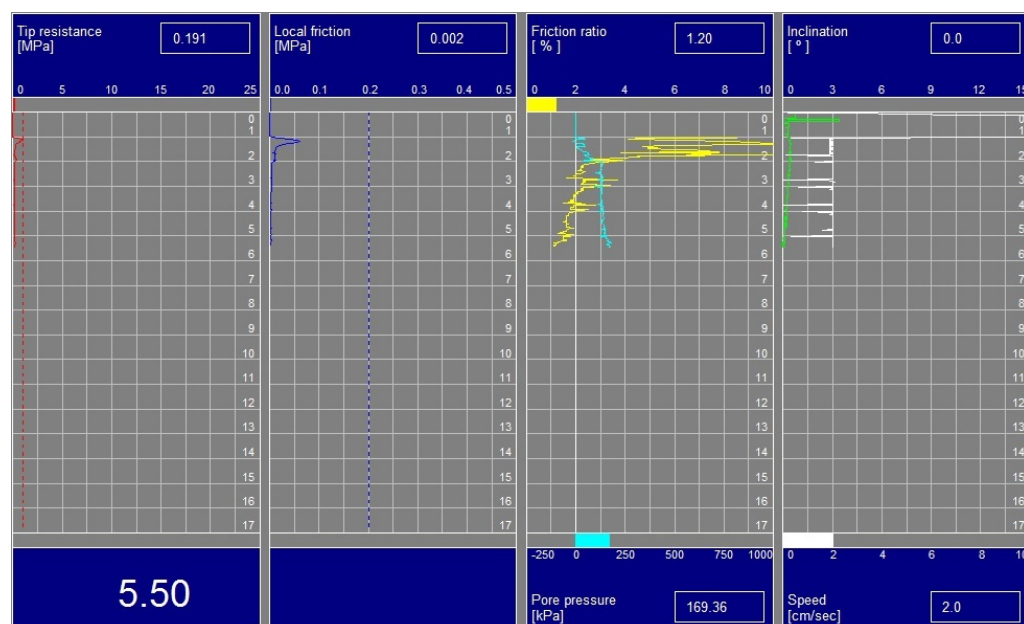
Ohut hiekkakerros savikerroksien välissä luokitellaan usein silttiseksi hiekaksi maan käyttäytymiskaaviossa (SBT). /4/ Tämä voi helposti johtaa väärään tulkintaan pienempänä vedenjohtokykyä kerroksessa. Tämä voi aiheuttaa yllätyksen esimerkiksi kaivantoa kaivaessa, mikäli kaivanto ulottuu tälle ohuen kerroksen syvyytasolle asti. Tulokinnassa on kuitenkin apuna myös CPTU-kairauskokeissa huokospainemittaus, joka auttaa tulokinnassa. Osa hyvistä tutkimuksista käsittelee pelkästään CPT-kairauskokeita, sillä CPTU-kehitettiin ja yleistyi vasta CPT:n jälkeen.

1.7 Esimerkkikohteet

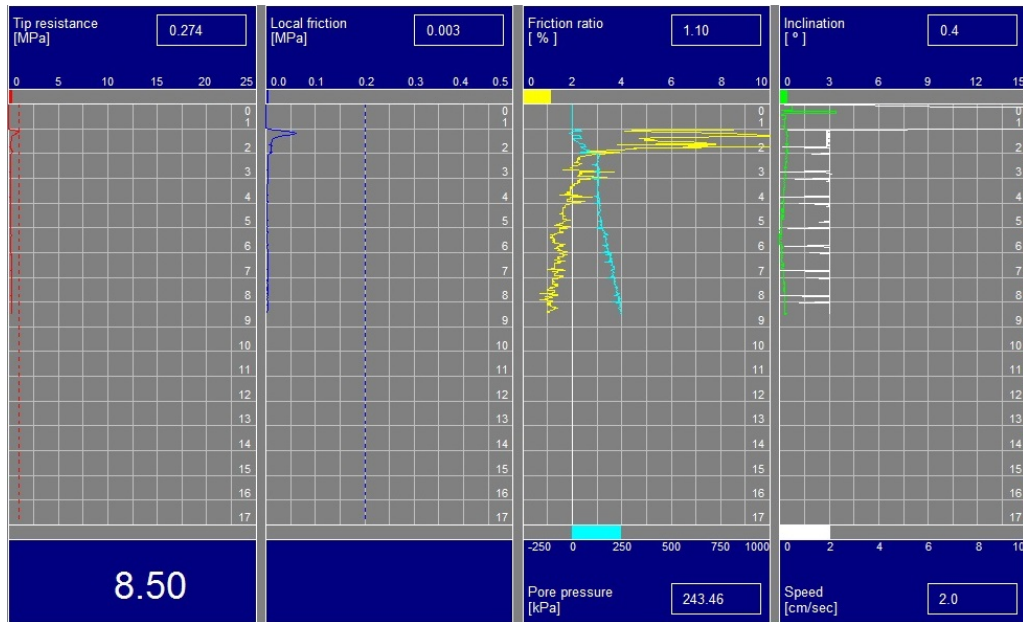
Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden yksikkö hankki syksyllä 2013 CPTUSR kairan, jonka tuloksia käytetään tässä esimerkkinä. Kairaukset on tehty syksyllä 2013 sekä syksyllä 2014. Hollannista hankittu laitteisto sisälsi CPTU-kärjet 0,75 t (herkkä) ja 7,5 t (suurikapasiteettinen), seismisen moduulin (S), resistiivisen moduulin (R), alhaalta pyörittävän siipikairan sekä kairausvaunun.

1.7.1 Kairauskokeen reaaliaikainen seuranta

Mittaustiedon reaaliaikaisella näkymisellä voidaan havaita kairauskokeen karkeat virheet välittömästi, kuten epäonnistunut kyllästäminen. Lisäksi voidaan varmistaa, että kairauksen suoruus täyttää vaatimukset ja kärjen kapasiteetti ei ole ylittynyt. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty esimerkkikuvina tällainen reaaliaikainen näkymä GOnsite! -ohjelmalla. Kuvassa punaisella on merkitty mitattu kärkivastus, sinisellä vaippavastus, turkoosilla huokospaine, keltaisella kitkasuhde, vihreällä kaltevuus ja valkoisella kairausnopeus.



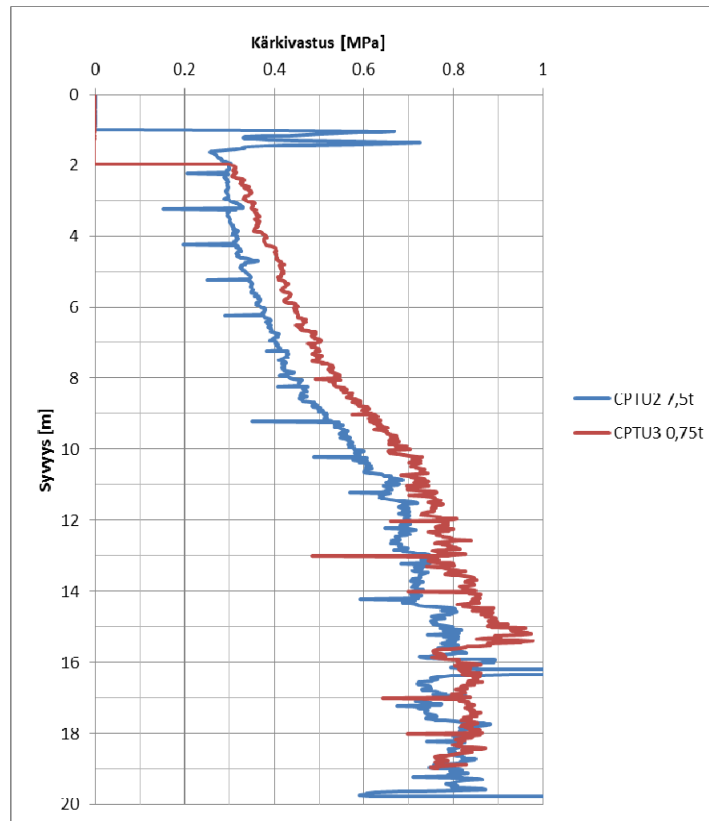
Kuva 33. Reaaliaikaisten mittausten näkyminen kairauskokeen avulla syvyydessä 5,5 m Perniössä



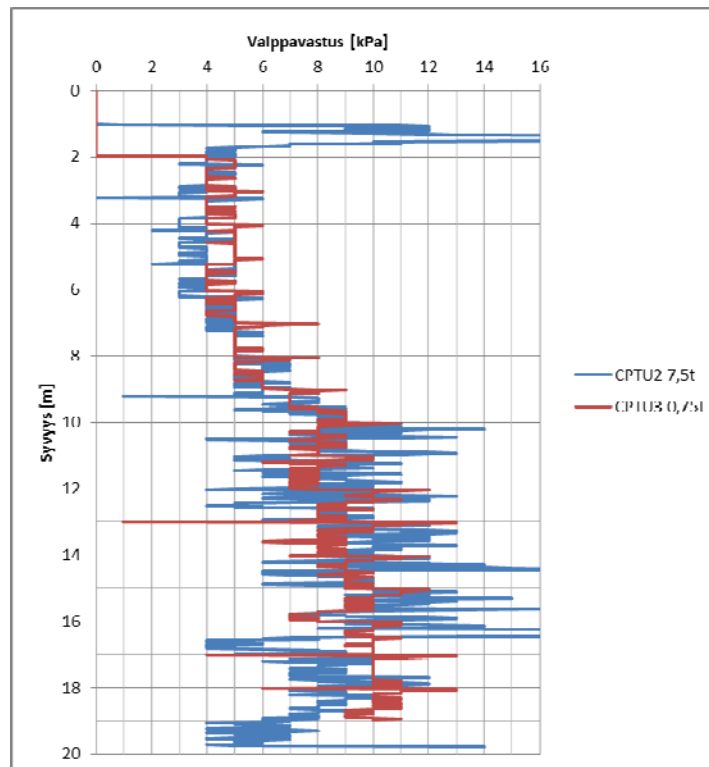
Kuva 34. Reaaliaikaisten mittausten näkyminen kairauskokeen avulla syvyydessä 8,5 m Perniössä

1.7.2 Oikean kärjen valinta

Muun muassa kärjen rakenteesta, resoluutiosta, kalibrointivirheestä ja mittaustarkkuudesta johtuen herkän ja suurikapasiteettisen kärjen tarkkuus varsinkin pienillä kuormilla eroaa kuvan 35 mukaisesti. Sallitut kuormitusvälit kärjillä ovat: kärkivastukselle 0–7,5 MPa (0–0,75t), vaippavastukselle 0–150 kPa herkällä kärjellä sekä vastaavasti suurikapasiteettisella kärjelle 0–75 MPa (0–7.5t) ja 0–1 MPa. Suurikapasiteettisen kärjen mittausravot ovat herkän kärjen arvoja pienempiä kärkivastuksen osalta sekä osittain pienempiä vaippavastuksen osalta kuvassa 36, mutta huokospaineen osalta arvot ovat samansuuruisia. Näiden kairauksen perusteella suurikapasiteettisen kärjen mittaustulokset kärkivastuksen osalta eivät ole riittävät parametrien määrittämiseen.

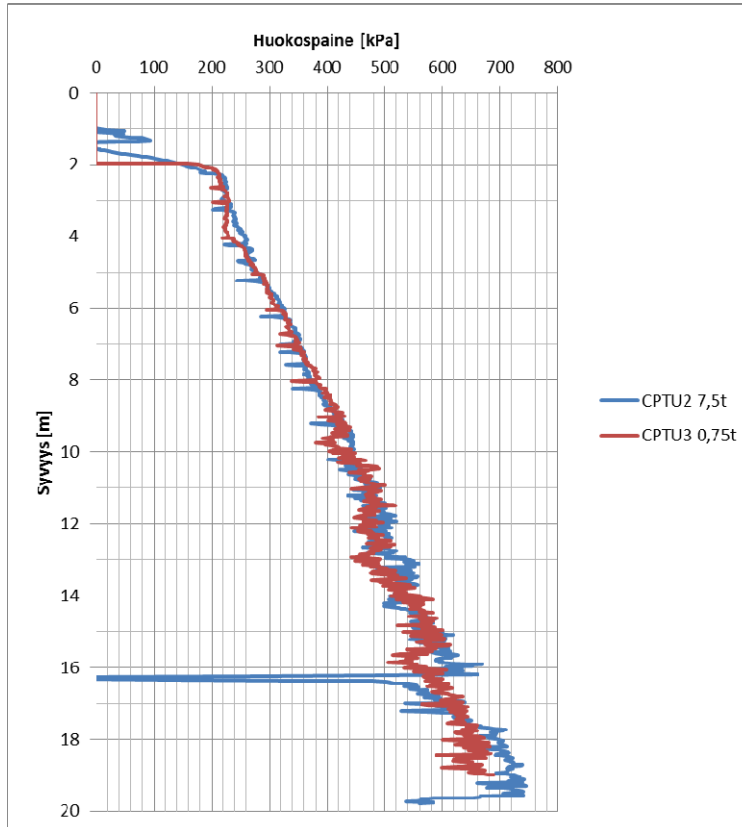


Kuva 35. *Herkän ja suurikapasiteettisen kärjen ero pienillä kärkivastuksilla savi-
kolla Liedossa. CPTU2-kairauskokeessa alkukairausreikä on 1 m syvä ja
CPTU3-kairauskokeessa 2 m.*



Kuva 36. *Herkän ja suurikapasiteettisen kärjen ero pienillä vaippavastuksilla
Liedossa*

Huokospainemittauksen arvot vastaavat hyvin toisiaan kuvassa 37. Osaltaan samantyyppiset tulokset selittyvät samalla sallitulla kuormitusvälillä 0–2 MPa. Tämä puoltaisi varsinkin suljetun leikkauslujuuden tulkinnassa huokospainemittaukseen perustuvaa tuloksentulkintaa, kun käytetty kärki ei ole tiedossa tai tutkimuksissa on käytetty vain suurikapasiteettista kärkeä.



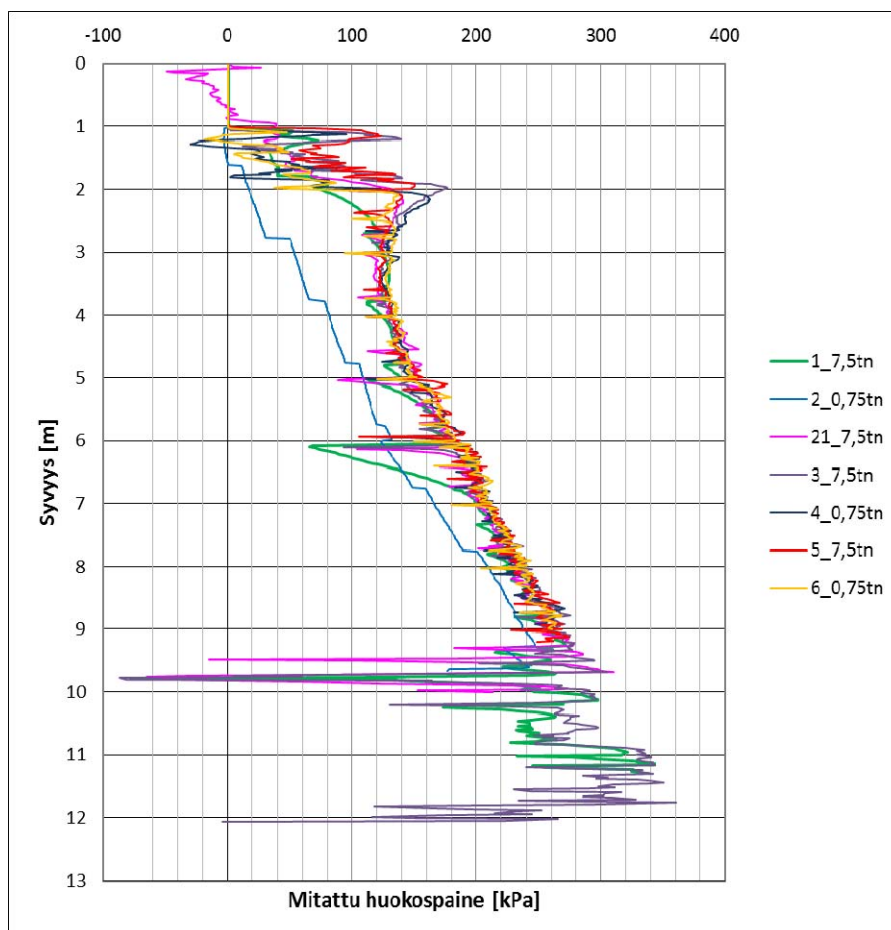
Kuva 37. Herkän ja suurikapasiteettisen kärjen huokospainemittaukset Liedossa

1.7.3 Epäonnistunut kyllästäminen/kyllästämisen menetys

Kuvassa 38 on havaittavissa kairauksen 2_0,75t kyllästämisen epäonnistuminen. Kairauksen aloituksen jälkeen signaali katkesi huonosti liitetyn liitoksen takia. Kärkeä oli ehditty painamaan maahan noin 0,5 m. Kärki nostettiin takaisin maanpinnalle ja liitokset tarkastettiin. Kärjen nostaminen takaisin maanpinnalle aiheutti kuitenkin kyllästämisen menetyksen, joka näkyy kuvaajassa portaittaisena paineen muutoksena sekä todellista pienempinä arvoina. Kärjen ylös nostamisen jälkeen kärki olisi pitänyt kyllästä uudelleen ennen uutta kairautusta.

Tuloksista kannattaa kiinnittää huomiota herkän ja suurikapasiteettisen kärjen samansuuruisiin arvoihin. Tämä osaltaan puoltaa leikkauslujuuden tulkintaa huokospaineesta normaalikonsolidoituneissa/lievästi ylikonsolidoituneissa koheesiomaissa, kunhan kyllästämisen onnistuminen kairauskokeissa on saatu riittävälle tasolle. Kärkien kuormitusalue huokospaineen osalta on sama, joka osaltaan selittää samansuuriset tulokset.

Kyllästäminen on yksi tärkeimpiä vaiheita CPTU-kairauskokeen onnistumisen kannalta. Epäonnistuneen kyllästyksen takia kairauskoe täyttää maksimissaan käyttöluokan 4:n vaatimukset. Tämä käyttöluokka sopii vain viitteelliseen profilointiin ja materiaalin yksilöintiin sisältäen suuria epävarmuuksia. Mikäli tilaajan vaatimuksena on tätä käyttöluokkaa pienemmät epävarmuudet, on kairauskokeen huokospaineen mittauksen onnistuttava.



Kuva 38. Epäonnistunut kyllästäminen sekä herkän ja suurikapasiteettisen kärjen sama toisto huokospaineen mittauksessa Perniössä

1.7.4 Suljetun leikkauslujuuden tulkinta

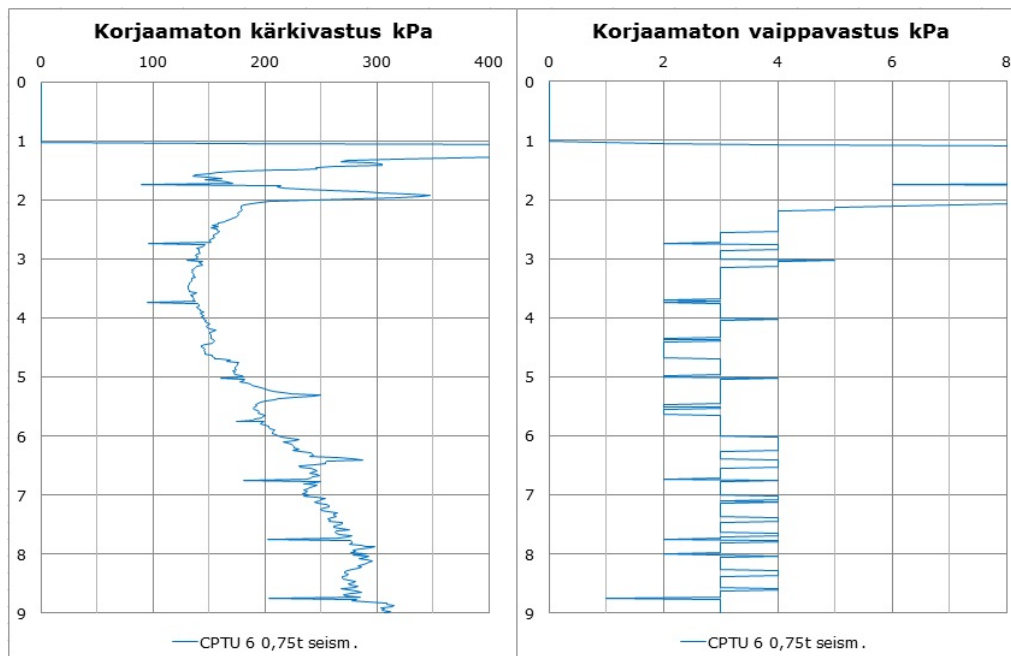
Suljetun leikkauslujuuden esimerkkikohteena on Perniön sorrutuskoealue. Perniön sorrutuskoe toteutettiin lokakuussa 2009 TTY:n ja Liikenneviraston yhteistyönä. Alue sijaitsee lihavalla savikolla vanhalla pellolla. Pinnassa on noin 0,3 m paksuinen humuskerros (0–0,3 m), jonka alla on noin metrin paksuinen kuivakuorikerros (0,3–1,3 m). Kuivakuoren alla on jäykkää savea, joka pehmenee syvyydellä 3,5 m asti. Pehmeä savikerros alkaa syvyydellä 3,5 m ja jatkuu noin syvyydellä 9,5 m asti. Saven alla on silttiä ja moreenia. Syvyydellä 1,5–3,5 m on toisinaan ohuita silttikerroksia. Myös syvyydellä 5,0–6,0 m on havaittu satunnaisia silttilinssejä. /22/ Näillä ohuilla silttikerroksilla voi olla suurikin vaikutus koestuksissa saataviin leikkauslujuuden arvoihin. Pehmeässä savessa on havaittu sulfidipitoisuutta. Tämä sulfidipitoisuus johtuu humuksesta, jonka pitoisuudessa on kerroksellista vaihtelua.

Syvyystasolla 2 m maan ylikonsolidoitumisaste on yli 2,5, mutta pienenee 1,5 m alempana normaali- tai lievästi ylikonsolidoituneelle tasolle. CPTU-tulkinnassa ylikonsolidoitumisastetta ei usein oteta huomioon, mikäli maa on vain lievästi ylikonsolidoitunutta. Tällöin tulkinta kaavasta kärkivastuksen osalta ylikonsolidoitumisasteen huomioonottava loppuosa supistuu ykköseksi.

Pohjavedenpinta on tulosten tulkinnassa oletettu olevan kuivakuoren alla n. 1,0 m syvyydessä. Vuosittainen pohjavedenpinnan vaihtelu näkyy kuivakuorikerroksen alapuolisena jäykkänä ylikonsolidoituneena savikerroksena.

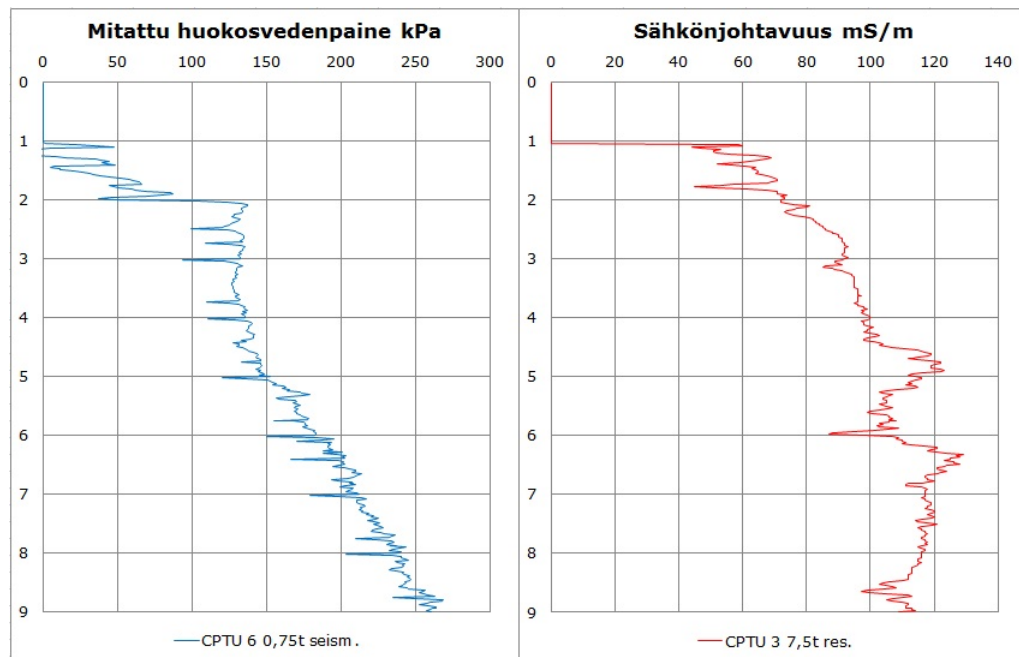
Tavallisen CPTU-kairauskokeen mittaustulosten lisäksi tarkasteluun on otettu CPTU-kärjen perään liitettävän sähkönjohtavuusmoduulin tulokset kuvassa 40. Sähkönjohtavuuden on todettu korreloivan vesipitoisuuden kanssa, mutta sähkönjohtavuuteen vaikuttaa myös mm. mineralogia, partikkelien koko, huokoisuus, kyllästymisaste, huokosveden suolapitoisuus ja lämpötila. Joka tapauksessa sähkönjohtavuuden portaittainen muutos ilmentää maassa jonkinlaista muutosta.

Kuvassa 39 on esitetty CPTU-kairauskoe 6:sen tulokset kärki- ja vaippavastuksen osalta. Kairauskoetta varten tehtiin 1 m syvä alkukairausreikä pohjavedenpinnan tasolle. Tankojen lisäyksestä johtuvat piikkiarvot erottuvat kuvaajassa syvyystasosta 1,7 m lähtien metrin lisäyksillä. Lisäksi kairauskokeessa on suoritettu myös seismisiä mittauksia, jolloin kairauskoe pysäytetään sen ajaksi. Nämä mittaukset on suoritettu syvyystasosta 2 m alaspäin metrin välein. Seismisten mittausten pysäytykset näkyvät paremmin mitatussa huokospaineessa kuvassa 39. Vaippavastuksen mittaustarkkuus on 1 kPa, mikä johtaa kuvan 38 kaltaiseen pykälämäiseen vaihteluun.



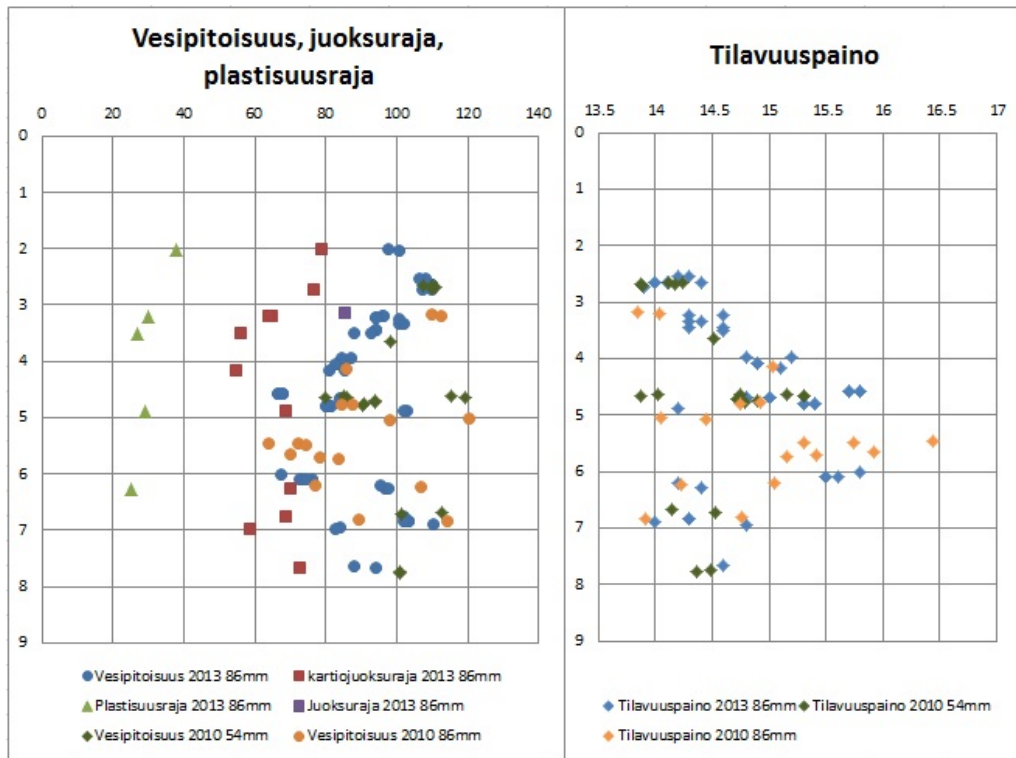
Kuva 39. Mitatut kärki- ja vaippavastukset Perniössä

Kuvassa 40 on esitetty mitattu huokosvedenpaine sekä sähkönjohtavuus. Mitattu huokosvedenpaine ja kärkevaston käyttäytyminen syvyydellä n. 1,2 m selittyy saven hyvin jäykkänä kerroksena, mikä mahdollisesti murtuu kuormitettaessa osin dilatoituen. Dilatoitumisesta johtuen huokosvedenpaine käy hetkellisesti vallitsevaa huokospainetasoa alempana. Tällainen murtuminen häiritsee maata laajemmin, mikä näkyy myös kärkevaston arvoissa. Mahdollisesti myös alkukairausreiän teossa maa on voinut häiriintyä syvemmälle tasolle asti aiheuttaen kuvaajan kaltaisen käyttäytymisen. Osassa CPTU-kairauskojeita kärkevastus pieneni tasaisemmin jäykässä savena.

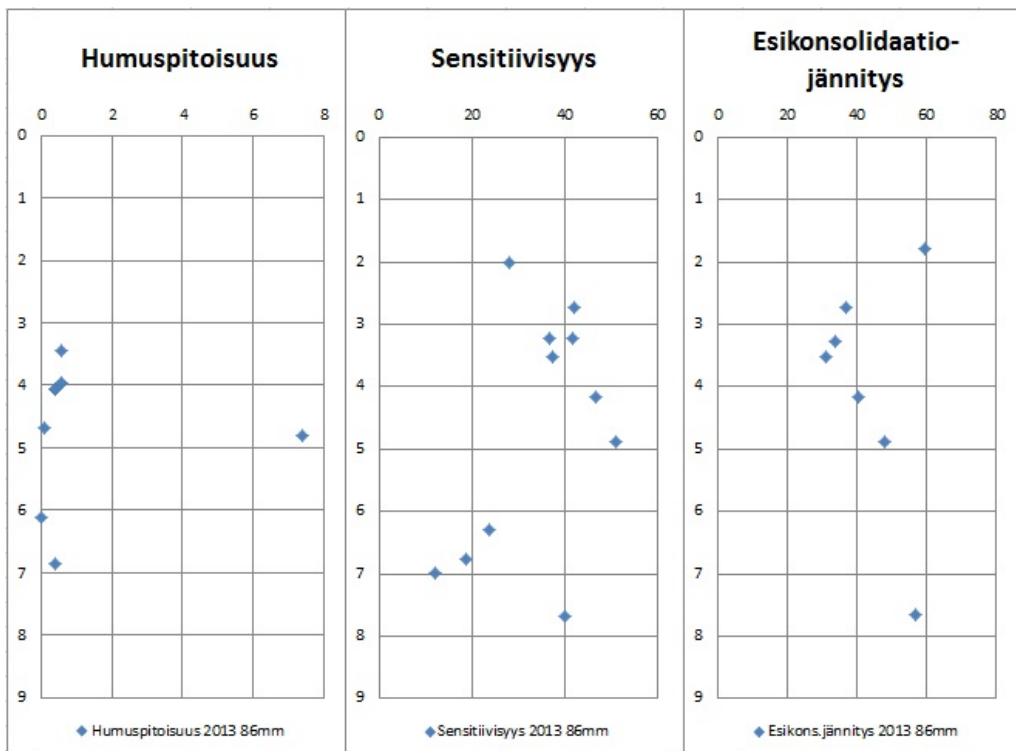


Kuva 40. Mitatut huokosvedenpaine ja sähkönjohtavuus Perniössä

Kuvissa 41 ja 42 on esitetty laboratoriokokeilla saatuja tuloksia.



Kuva 41. Perniön laboratoriomäärittäjiä

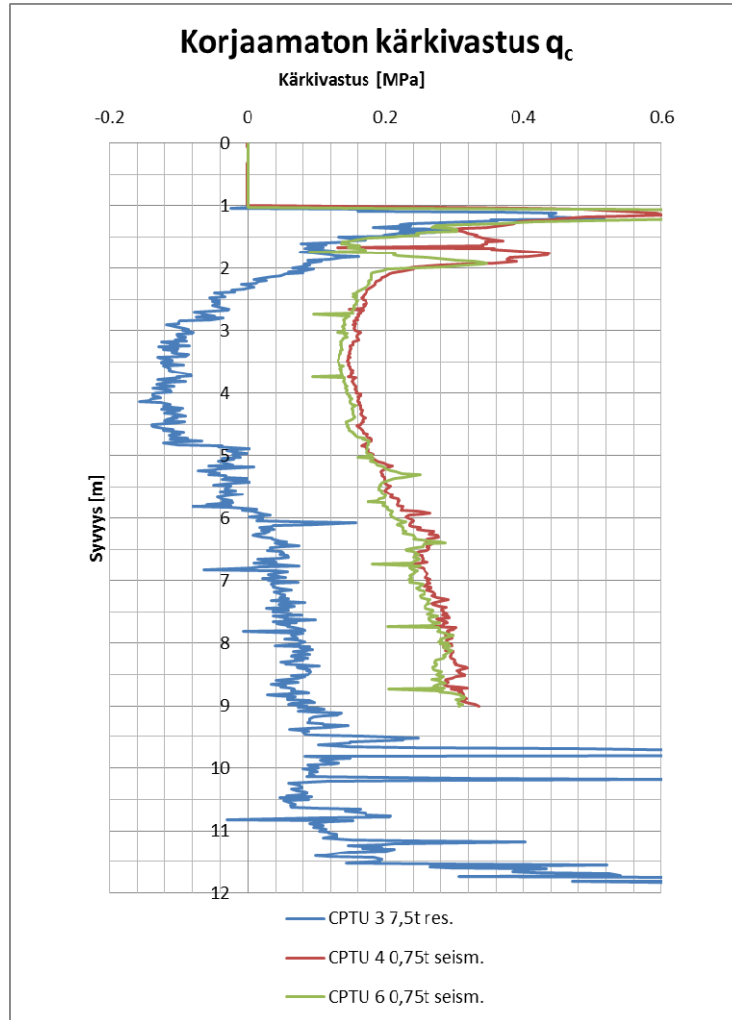


Kuva 42. Perniö laboratoriomäärittäjiä

Suljetun leikkauslujuuden tulkinnan tulokset korjatusta kärkivastuksesta ja mitatusta huokospaineesta on esitetty kuvassa 44. Siipikairautulokset on alhaalta pyörittävästä sekä mittaavasta siipikairauslaitteistosta, mikä täyttää eurostandardin vaativimman luokan. Siipikairautulokset on esitetty tarkemmin liitteessä 1 90 asteen pyöriykselle. Pieni pykälä osassa diagrammeissa on seurausta tankojen kiristymisestä, mikä voitaisiin välttää tiukemmalla tankojen kiristämällä. Siipikairaus- ja CPTU-kairauskokeen välinen etäisyys on 10 m, mikä voi osittain vaikuttaa kerrosrajojen tasoon.

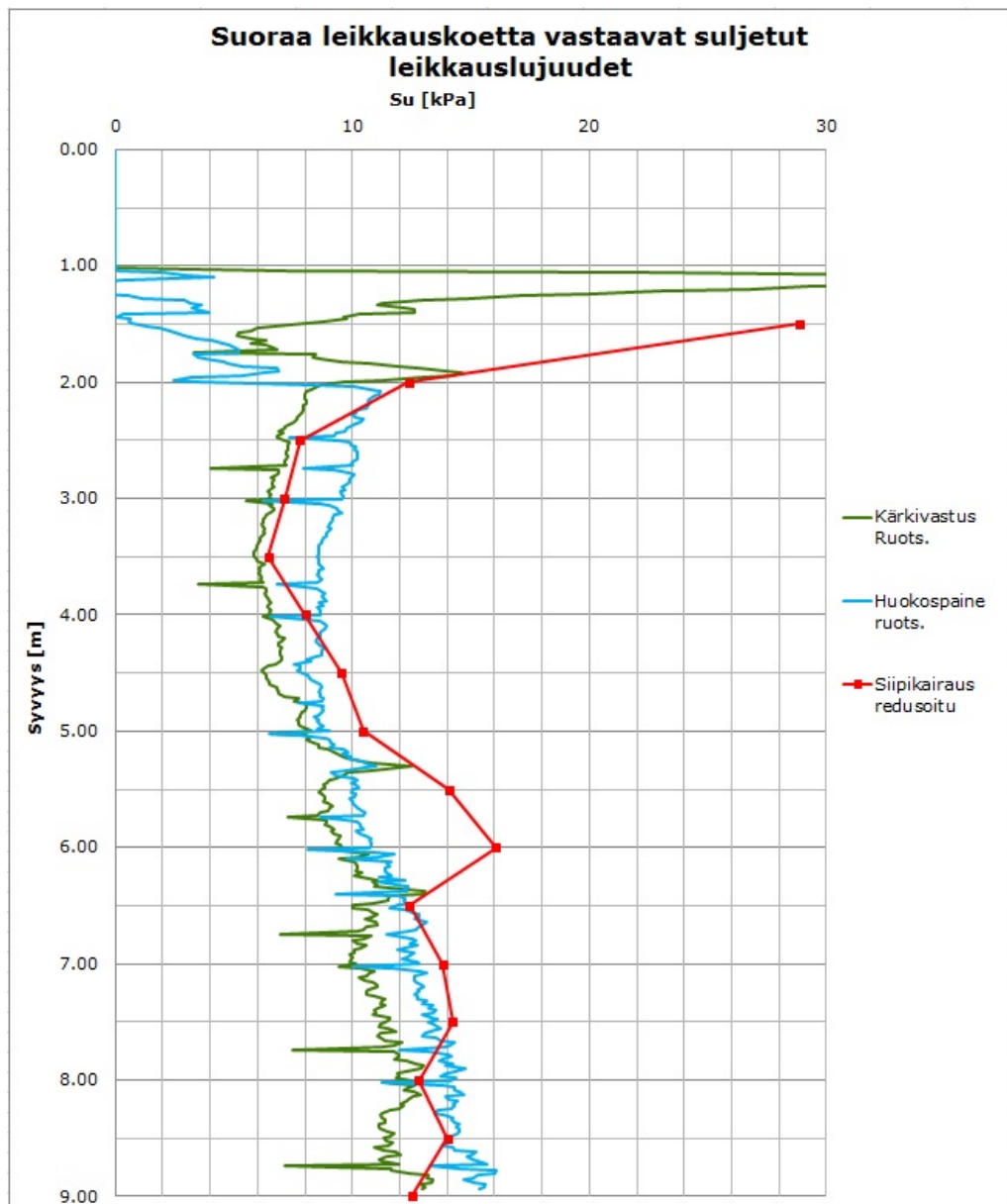
CPTU-tulkinnassa syvyystasolla 5,3 m nähtävä leikkauslujuuden piikki sekä siiven 5,5 m tason CPTU-tulkintaa suurempi leikkauslujuus johtuvat mahdollisesti samasta ohuesta, mutta lujemmasta maalajikerroksesta. Siiven syvyystaso on sama kuin siiven alapinnan taso. Siipikokona käytettiin 75 mm*150 mm siipeä eli siipi on mitannut leikkauslujuuden tasolta 5,35–5,50 m, vaikka syvyystaso on merkitty tasoon 5,5 m.

Aiempien tutkimusten perusteella syvyystasolla 5–6 m on esiintynyt satunnaisesti silttilinsejä, tällainen silttilinssi on mahdollisesti osunut myös siiven pyöräytystasolle 6 m. CPTU-tuloksissa taas ei tätä silttilinssiä ole havaittavissa, paitsi CPTU 3:n sähkönjohtavuuden mittauksissa. Sähkönjohtavuuden mittauksissa on nähtävissä sähkönjohtavuuden piikkimäinen pieneneminen, mikä viittaisi pienempään vesipitoisuuteen esim. silttimaahan. Kuvassa 43 on esitetty tämän takia myös CPTU 3:n mitattu kärkivastus, mistä on nähtävissä tämä mahdollinen silttilinssi. CPTU 3 kairauskoe on tehty suurikapasiteettisella kärjellä, joten sen arvot eivät sovi suljetun leikkauslujuuden tulkintaan. Suurikapasiteettisen ja herkän kärjen kärkivastuksien ero poikkeaa myös aiemmin esitetyn kuvan 35 erosta, sillä suurikapasiteettisessa kärjessä todettiin myöhemmin viallinen signaalin digitalisoija. Kuvan 35 kairauskokeet on tehty korjauksen jälkeen.



Kuva 43. CPTU 3 -kärkivastuksen mitatut arvot Perniössä

Muuten leikkauslujuuden tulkinnassa on nähtävissä hyvä korrelaatio CPTU-tulosten ja siiven tulosten välillä savimaassa. Tutkimusta on tarkoitus jatkaa kattamaan laajemmin eri hienojakoiset maalajit, jotta voidaan todeta yleisesti CPTU:n sopivan suljetun leikkauslujuuden tulkitsemiseen. Laajemman tutkimusaineiston avulla voidaan myös mahdollisesti parantaa tulkintaa.



Kuva 44. Perniö suljettu leikkauslujuus tulkinta

Lähteet

- /1/ Robertson, P.K., Cabal, K.L. 2010 Guide to cone penetration testing, Gregg Drilling & Testing, Inc, California 2010, 4th edition
- /2/ Campanella, R.G., Howie, J.A. 2005 Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data, Geotechnical research group, Department of civil engineering, The university of British Columbia 2005.
- /3/ Kairausopas 6 2001 - CPTU/puristinkairaus - puristin-heijarikairaus. Versio 1.00 - 7.6.2001. Suomen geoteknillinen yhdistys ry. Nummela: Nummelan Kopiopalvelu Oy. s.97
- /4/ Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. 1997. Cone penetration testing. Geotechnical Practice.
- /5/ Powell, J. J., & Lunne, T. 2005. Use of CPTU data in clays/fine grained soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 27.
- /6/ Dolva, B. K. 2010. CPTU-seminar i Vegdirektoratet, Statens vegvesen, Teknologi-rapport;2595, 26. april 2010. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/11250/190021>
- /7/ NGI, CPT - a useful tool in geotechnical investigations. Saatavilla: [http://www.danskgeotekniskforening.dk/media/DGM_%C3%85rhus_Mai_13_Final_\(Tom_Lunne\).pdf](http://www.danskgeotekniskforening.dk/media/DGM_%C3%85rhus_Mai_13_Final_(Tom_Lunne).pdf)
- /8/ Larsson, R. 2007. CPT-sondering. Swedish Geotechnical Institute, Information, (15).
- /9/ ISO, E. 22476-1.2007. Geotechnical investigation and testing-field testing-part, 1.
- /10/ Larsson, R., & Mulabdic, M. 1991. Piezocone tests in clay. SGI REPORT, (42).
- /11/ ASTM D5778-12. 2012. Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D5778-12
- /12/ Löfroth, H. 2008. Undrained shear strength in clay slopes – Influence of stress conditions – A model and field test study. Thesis. Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Geo Engineering, Geotechnical Engineering, Gothenburg
- /13/ Karlsrud K., Lunne T., Kort D.A., Strandvik S. 2005: CPTU correlations for clays. Proc. of the XVI-th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka 2005, 693-702.
- /14/ Bembem, S.M., Myers, H.J. 1974 The influence of rate of penetration on static cone resistance in Connecticut River Valley varved clay. Proceedings of the European symposium on penetration testing, ESOPT, Stockholm, 2.2, 33-4

- /15/ Roy, M., Tremblay, M., Tavenas, F, La Rochelle, P. 1982 Development of pore pressures in quasi-static penetration tests in sensitive clay. Canadian Geotechnical Journal, 19(2), 124-38
- /16/ Vreugdenhill, R., Davis, R., Berrill, J. 1994 Interpretation of cone penetration results in multilayered soils. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18 (9), 585-99
- /17/ Sandven, R. 2010. Influence of test equipment and procedures on obtained accuracy in CPTU, Proceedings, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, 26 pp.
- /18/ Powell, J. J., Lunne, T. 2005. Use of CPTU data in clays/fine grained soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 27.
- /19/ Selänpää, J. 2014 Koheesiomaiden suljetun leikkauslujuuden tutkiminen CPTU:lla sekä laboratoriokokeilla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 101 s
- /20/ Larsson, R., 2007 CPT-sondering utrustning – utförande – utvärdering En in-situ metod för bestämning av jordlagerföljd och egenskaper i jord. Swedish geotechnical institute. Linköping 2007. Information 15. s.71
- /21/ Selkämaa, E. 1994 Koepenger Seinäjoki, Murro, Insinööritö, Seinäjoen teknillinen oppilaitos, rakennustekniikan osasto. Seinäjoki 1994.
- /22/ Mataic, I., 2013 Structure and rate-depence of Perniö clay. Pohjanvahvistuspäivän esitys 22.8.2013, Aalto-yliopisto, Espoo.
- /23/ Honkanen, H., Kajaanin ammattikorkeakoulun opetusmateriaali. Saatavilla: http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/ELE_A%20N%20T%20U%20R%20I%20T.pdf

Perniön siipikairaustulokset

